

На правах рукописи

Яцун Ирина Валерьевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ С РЕНТГЕНОЗАЩИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование
деревопереработки

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург 2020

Диссертационная работа выполнена на кафедре механической обработки древесины и производственной безопасности ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный консультант	Гороховский Александр Григорьевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой автоматизации и инновационных технологий
Официальные оппоненты	Бирман Алексей Романович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», профессор кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса Шамаев Владимир Александрович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», профессор кафедры древесиноведения Исаев Сергей Петрович доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры «Технологии лесопользования и ландшафтного строительства»
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «28» мая 2020 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, зал заседаний – аудитория 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» <http://www.usfeu.ru>.

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
доцент

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Технический прогресс порождает необходимость разработки и создания новых материалов. Одним из основных способов их создания, на сегодня, является комбинирование различных известных материалов. Поэтому большинство современных материалов представляют собой композиции, которые позволяют изделиям обладать определенным сочетанием заранее задаваемых свойств. Совместная работа разнородных элементов, входящих в состав композита, дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойство которого и количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих.

Древесные композиционные материалы – это материалы, которые наполнены древесиной в различных ее видах. В настоящее время к древесным композитам относят: модифицированную древесину, материалы, полученные на основе лущеного шпона, а также и материалы, наполненные древесными частицами.

Древесные композиционные материалы нашли широкое использование в строительстве, производстве мебели и тары, машиностроении и др. отраслях промышленности. Области использования таких материалов и изделий на их основе постоянно расширяются. Способствует этому такие факторы, как возобновляемость древесины, необходимость рационального использования отходов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, растущий спрос потребителей на экологически чистые и безопасные материалы.

Одним из наиболее перспективных направлений этой задачи в настоящее время является создание древесных композиционных материалов на основе древесины и древесных отходов, обладающих специальными свойствами, в частности рентгенозащитными. Таким образом, проблема создания древесных композиционных материалов на основе лущеного шпона и древесных частиц, обладающих специальными свойствами представляется актуальной и своевременной.

Степень разработанности темы исследования. Разработкой композиционных материалов на основе древесины занимались такие ученые, как А.Н. Минин, Н.Т. Романов, Н.Я. Солечник, В. Н. Петри, В.А. Шамаев, Р.Г. Сафин, В.В. Глухих, В.Г. Бурындин, А.Г. Гороховский, Ю.И. Ветошкин, А. Н. Обливин, С.А. Угрюмов, А.А. Аксомитный и др. Исследованиям рентгенозащитных свойств древесины посвящены работы А.П. Берсенева, А.Г. Фокина, Ю.И. Щеткина, Л.М. Исаева, Ю.И. Щетинина, Л.Н. Исаева. Анализу взаимодействия древесины и нейтронных потоков малых и средних энергий посвящены работы В.И. Пятакина, А.Р. Бирмана, Ю.Д. Силукова. Разработкой фанеры для рентгенодиагностических аппаратов занималась Н.Ю. Шорникова.

Цель работы. Повышение эффективности производства и расширения области применения древесных композиционных материалов.

Предмет исследования. Закономерности процесса формирования композиционных материалов на основе лущеного шпона и древесных частиц, обладающих рентгенозащитными свойствами.

Объект исследования. Древесные композиционные материалы, обладающие рентгенозащитными свойствами.

Научной новизной обладают:

1. Результаты моделирования процесса контактного взаимодействия поверхностей шпона в процессе формирования древесного композиционного материала с применением адгезива на основе легкоплавкого сплава;
2. Результаты компьютерного моделирования процесса формирования древесного композиционного материала на основе порошкового связующего;
3. Результаты компьютерного моделирования состояния «напряжение – деформация» древесных композиционных материалов, обладающих рентгенозащитными свойствами;
4. Математические модели зависимостей физико-механических свойств материалов «Фанотрен А» и «Фанотрен Б» от режимных параметров их получения и материалов «Плитотрен» и «DS-1» от их рецептуры;
5. Рациональные значения режимных параметров формирования материалов «Фанотрен А» и «Фанотрен Б» и значения количества исходных компонентов в рецептуре материалов «Плитотрен» и «DS-1».

Теоретическая значимость:

- математически описано распределение неровностей на поверхности лущеного шпона корреляционными и аппроксимирующими функциями Лаггера второго типа;
- математически описан процесс контактного взаимодействия между листами лущеного шпона в процессе их склеивания с использованием кривой опорной поверхности;
- математически описаны процессы тепломассопереноса в процессе пресования композиционных материалов на основе древесных частиц с использованием системы ДУЧП при контактом нагреве влажного пористого тела с введением внутренних коэффициентов тепло- и массообмена.
- математически описано напряженно – деформированное состояние разработанных древесных композиционных материала с использованием теории изгиба пластин определяющее их жесткостно-прочностные показатели.

Практическая значимость:

- разработана технология получения листового проката на основе легкоплавкого сплава для армирования композиционного материала;
- разработана рецептура рентгенозащитной пропитывающей композиции для РЗС (материал Фанотрен Б);
- разработаны рецептуры древесно-клеевой композиции для формирования композиционных материалов «Плитотрен» и «DS-1»;
- разработаны технологии получения рентгенозащитных древесных композиционных материалов.

Методы исследования. При выполнении работы использованы следующие методы: наименьших квадратов и кривой опорной поверхности для характеристики микрогеометрии поверхности лущеного шпона; метод конечных разностей для описания процессов тепломассопереноса в процессе горячего пресования материалов на основе древесных частиц; метод конечных элементов

для определения жесткостно-прочностных показателей предлагаемых материалов; метод электронного сканирования и микросъемки для исследования внутренней структуры материалов; метод фотометрической контрастности изображения по рентгенопрозрачности и фотометрической контрастности изображения на рентгенограмме для определения защитных свойств материалов; стандартные методики определения физико-механических свойств материалов, согласно ГОСТ 9621-72, ГОСТ 9625-87, ГОСТ 9624-2009, ГОСТ 9622-87, ГОСТ 10634-88, ГОСТ 10635-88, ГОСТ 10634-88, ГОСТ 11842-76, ГОСТ 11843-76, ГОСТ 9012-59, ГОСТ 276787-88, ГОСТ 16483.14-72.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В процессе формирования древесного композиционного материала «Фанотрен А» с применением в качестве связующего легкоплавкого сплава роль механической адгезии является определяющей, т.к. при соединении разнородных по физико-химическому составу материалов прочность клееного соединения обеспечивается «якорным зацеплением» разветвленной структуры, проникшего во внутренние слои шпона связующего в период предшествующий его затвердеванию.

2. В процессе прессования древесного композиционного материала на порошковом связующем относительно малые величины давления парогазовой смеси и его градиента обуславливают незначительный перенос тепла в плоскости плиты за счет конденсации и конвекции, что уменьшает скорость прогрева прессуемого пакета. Это приводит к увеличению продолжительности выдержки под давлением и к уменьшению времени снижения давления.

3. Поведение древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами, в момент нахождения их под нагрузкой описываются уравнением Софи-Жермен.

4. Механизм формирования древесного композиционного материала «Плитотрен» заключается в поэтапном введении связующего в процессе приготовления древесно-клеевой композиции. Этим достигается ее однородность, улучшение контактного взаимодействия между древесными частицами и частицами наполнителя и повышение рентгенозащитных защитных свойств материала.

5. В процессе формирования древесного композиционного материала «DS-1» порошковое связующее, расплавляясь, обволакивает древесные частицы и равномерно распределяет частицы наполнителя, что способствует повышению его рентгенозащитных свойств.

Достоверность результатов. Результаты исследований основаны на использовании фундаментальных положений теории вероятности, теории прессования древесностружечных плит, теории изгиба пластин, теории ослабления электромагнитного излучения, вероятно – статистических методах, методах оценки случайных погрешностей в измерениях, методах моделирования в научных исследованиях. Достоверность результатов исследований по определению рецептуры пропитывающей композиции для рентгенозащитного слоя (РЗС), входящего в состав материала «Фанотрен Б», состав древесно-клеевой композиции для материалов «Плитотрен» и «DS-1», а также физико-механические свойства полученные по расчетным моделям подтверждается

применением методов математической статистики для обработки опытных данных, оценкой погрешностей и экспериментальной проверкой этих данных и положительными результатами промышленной апробации.

Апробация работы. Результаты работы доложены, обсуждены и получили положительные оценки на семинаре рентгенологов Свердловской области (г. Екатеринбург 1995 г.); на VII и IX всероссийских научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (г. Екатеринбург 2011, 2013 г.г.); на XII, IX, XII и XIV Международном Евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (г. Екатеринбург 2012, 2014, 2017, 2019 г.г.); на Международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (г. Воронеж 2014 г.).

Разработанные древесные композиционные материалы были представлены на Международной выставке-ярмарке «Архитектура. Строительство», «Лес. Деревообработка» (г. Новокузнецк 1998 г.); выставках «Здравоохранение России-99», «Аптека-99» (г. Екатеринбург 1999 г.), «Строительный комплекс Большого Урала» (г. Екатеринбург 2006 г.); Международной выставке «Технические средства обороны и защиты» (г. Нижний Тагил 2001 г.); V Специализированной межрегиональной выставке-ярмарке «Лесной комплекс» (г. Екатеринбург, 2003 г.).

Результаты исследований апробированы на ЗАО «Этюд-Урал» (г. Екатеринбург), ООО «БиКдрев» (г. Екатеринбург) и Свердловском областном психоневрологическом госпитале для ветеранов войн (г. Екатеринбург).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 48 печатных работ, из них 1 статья в издании, цитируемом в Web of Science, 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента и 3 монографии.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа включает введение, шесть глав, основные выводы и рекомендации результатов исследований, библиографический список, включающий 305 наименований и 42 приложения. Общий объем работы 313 страниц, в том числе 264 страницы основного текста, 99 рисунков и 84 таблицы, 49 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель исследования, основные положения, выносимые на защиту. Раскрывается научная новизна работы, значимость ее результатов для науки и практики. Содержатся данные о месте проведения работы, структуре и объеме диссертации.

В первой главе по литературным источникам приводятся анализ материалов, применяемых для защиты от рентгеновского излучения. Рассмотрены вопросы механизма ослабления данного вида излучения защитными материалами и приведены требования, предъявляемые к ним.

Во второй главе приведены теоретические исследования по формированию предложенных вариантов древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами:

- «Фанотрен А» (фанера от рентгена) – выполнен на основе березового лущеного шпона и армирован фольгой из легкоплавкого сплава Вуда. Фольга в конструкции выполняет одновременно роль адгезива и рентгенозащитного слоя;

- «Фанотрен Б» - это модификация материала «Фанотрен А» - выполнен на основе березового лущеного шпона, в качестве армирующего слоя использованы рентгенозащитные слои (РЗС), представляющие собой композиционный материал, состоящий из волокнистого наполнителя (в частности синтепона), наполненного рентгенозащитной пропитывающей композицией на основе минерального наполнителя (сульфата бария);

- «Плитотрен» - аналог древесностружечной плиты, выполнен на основе древесной стружки (в основном сосны), связующего и минерального наполнителя (сульфата бария);

- «DS-1» - аналог плиты МДФ, выполнен на основе мелкодисперсных древесных частиц (опилок фракции менее 2 мм), порошкового связующего и минерального наполнителя (сульфата бария).

Одним из возможных вариантов формирования древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами является создание слоистых материалов по принципу фанеры. Получаемые в процессе формирования физико-механические и рентгенозащитные свойства материала «Фанотрен А», а также его себестоимость, напрямую будут определяться расходом армирующего слоя, которым в предлагаемой конструкции является фольга из сплава Вуда.

Для обеспечения прочного соединения и достаточного уровня рентгенозащитных свойств общее количество адгезива расходуется:

- на заполнение объема зазора между контактирующими поверхностями лущеного шпона;

- на создание сплошного рентгенозащитного слоя;

- на проникновение в граничные слои шпона.

Установлено, что поверхность лущеного шпона следует отнести к случайной анизотропной, ее профиль характеризуется профилограммой, которую можно представить как реализацию нормального стационарного случайного процесса. Распределение неровностей на поверхности лущеного шпона подчиняется математическому описанию:

- корреляционными функциями:

$$K_x(t) \approx \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)x(t+\tau)dt, \quad (1)$$

- аппроксимирующими функциями второго типа (членами преобразования Лагерра):

$$\begin{aligned} \text{I тип} \quad \rho(\tau) &= e^{-\alpha\tau^2} \\ \text{II тип} \quad \rho(\tau) &= e^{-\alpha\tau^2} \cos \omega\tau \\ \text{III тип} \quad \rho(\tau) &= C_1 e^{-\alpha\tau^2} \cos \omega_1\tau + \cos \omega_2\tau \end{aligned} \quad (2)$$

- кривой опорной поверхности, как одной из характеристик микрогеометрии шероховатой поверхности:

$$\eta_s = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{1 - 2\varepsilon}{2\sigma} \right) \right], \quad (3)$$

где: T – длина профилограммы (2,5 мм по ГОСТ 7016-82);

τ – переменная разность между абсциссами двух сечений профилограммы;

$x(t)$ – ординаты профилограммы в выбранной системе координат;

α, ω – параметры аппроксимации коррелирующих функций;

η_s – относительная площадь сечения материала;

Φ – интеграл вероятностей;

ε – относительное сближение;

σ – стандартное отклонение профиля:

$$\sigma = \frac{h_{ск}}{R_{max}}, \quad (4)$$

где: $h_{ск}$ – среднее квадратическое отклонение высоты неровностей от средней линии, мкм;

R_{max} – максимальная высота неровностей, мкм.

Расчет контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, выполненный по методике, предложенный в машиностроении, с использованием кривой опорной поверхности, в достаточной степени отражает контакт листов шпона в процессе формирования материала «Фанотрен А» (рисунок 1).

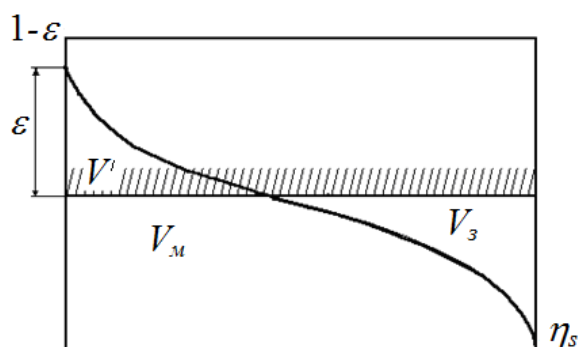


Рисунок 1 - Схема расчета плотности стыка при контакте: V_m – объем материала, рассчитанный на единицу контурной площади контакта; V_z – объем зазора;

V' – уменьшение объема материала за счет деформации выступов

Т.к. сплошной армирующий слой в предлагаемой конструкции материала выполняет основную рентгенозащитную роль, то для определения минимальной толщины воспользуемся основным законом ослабления рентгеновского излучения:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (5)$$

где: I_0 и I – соответственно интенсивность излучения, падающего на вещество и прошедшего через слой материала толщиной x ;

μ – линейный коэффициент ослабления вещества, см⁻¹;

x – толщина защитного слоя, см.

Массовый коэффициент ослабления характеризует ослабление излучения массы вещества:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad (6)$$

где: μ_m - массовый коэффициент ослабления, $\text{см}^2/\text{г}$;
 ρ - плотность, $\text{г}/\text{см}^3$.

Если вещество имеет сложный химический состав, тогда:

$$\mu_m = \mu_{m1}P_1 + \mu_{m2}P_2 + \dots + \mu_{mn}P_n, \quad (7)$$

где: $\mu_{m1} = \frac{\mu_1}{\rho_1}$, $\mu_{m2} = \frac{\mu_2}{\rho_2}$, ..., $\mu_{mn} = \frac{\mu_n}{\rho_n}$ - массовые коэффициенты
 ослабления частей, входящих в состав;

P_1, P_2, \dots, P_n - их относительные весовые количества.

Полученная зависимость величины линейного коэффициента фольги из сплава Вуда от ее толщины представлена на рисунке 2.

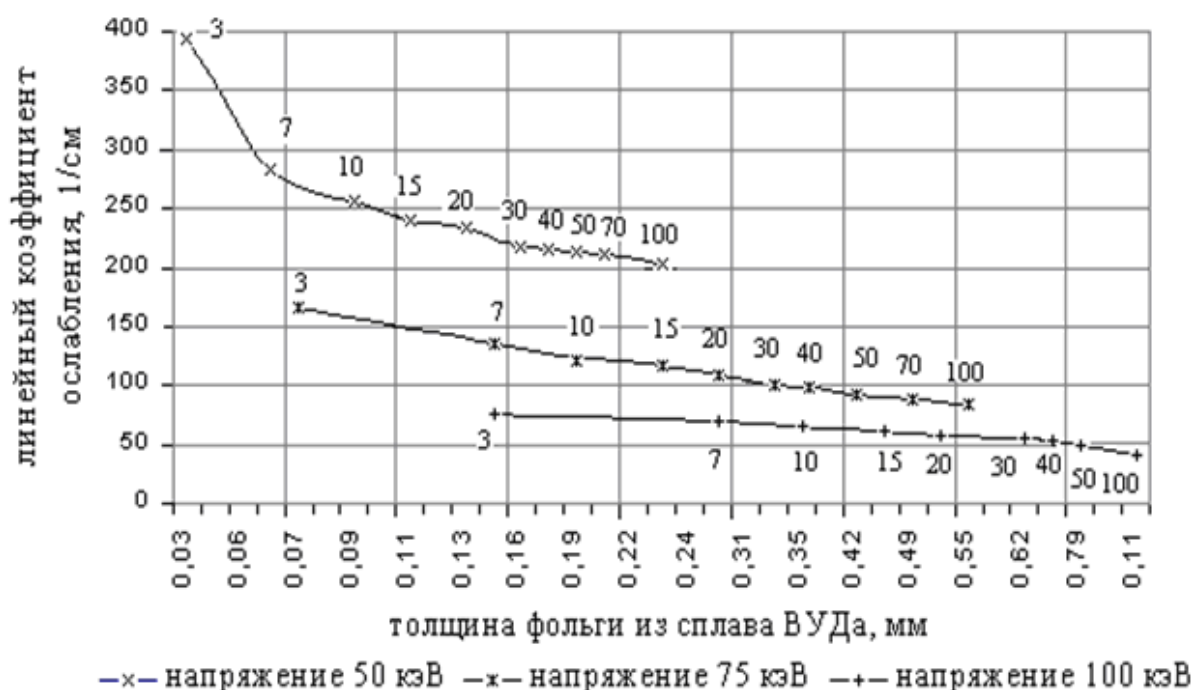


Рисунок 2 - Зависимость линейного коэффициента рентгеновского излучения фольгой из сплава Вуда от ее толщины (цифрами обозначена кратность ослабления рентгеновского излучения)

Из представленных на рисунке 2 зависимостей видно, что при рабочем напряжении 75 кВ и кратности ослабления рентгеновского излучения 40 толщина рентгенозащитного слоя должна составлять не менее 0,36 мм, т.е. при создании трехслойной конструкции материала «Фанотрен А», имеющей два армирующих слоя, толщина каждого из них должна быть равна 0,18 мм.

В результате установлено, что толщина фольги (с учетом того, что адгезив проникает в граничные слои шпона на полезную глубину, которая в среднем составляет 0,3 мм) колеблется от 0,299 до 0,305 мм (рисунок 3).

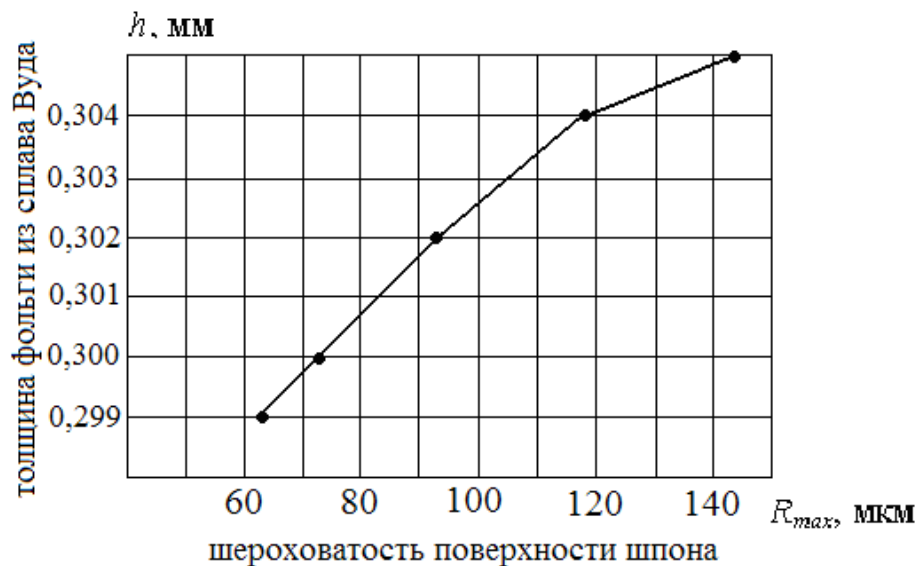


Рисунок 3 - Зависимость толщины фольги от величины шероховатости поверхности шпона при формировании материала «Фанотрен А»

Еще одним из возможных вариантов формирования древесных композитов, обладающих рентгенозащитными свойствами, является создание плитных материалов по принципу ДСтП и МДФ. В этих материалах в качестве армирующего элемента используются древесные частицы, связующим является клей на порошковой основе, а наполнителем (для придания рентгенозащитных свойств) - минеральный наполнитель (сульфат бария).

Процесс горячего прессования подобных материалов представляет контактный нагрев пористого тела, находящегося во влажном состоянии. В процессе движения парогазовой смеси происходит перенос тепла внутри прессуемого пакета за счет теплопроводности и конвекции. Большое влияние на процессы переноса тепла оказывают фазовые переходы (кипение – конденсация), что накладывает дополнительные трудности при расчете тепло- и массопереноса внутри пакета.

Поскольку в качестве связующего при формировании материала «DS-1» применяется клей на порошковой основе, то вносимое в прессуемый пакет количество влаги невелико, поэтому следует ожидать, что давление парогазовой смеси должно быть ощутимо меньше, чем при прессовании ДСтП. Следовательно, должно произойти снижение интенсивности процессов тепломассопереноса в прессуемом пакете, и снизится интенсивность отверждения применяемого связующего.

При выводе уравнений тепломассопереноса учитывались предположения:

- «движение паровоздушной смеси внутри пористого тела подчиняется закону Дарси»;
- «диффузионный перенос массы пренебрежимо мал по сравнению с фильтрационным переносом»;
- «скелет пористого тела химически не взаимодействует с паровоздушной смесью».

Сформулированная система дифференциальных уравнений тепломассопереноса включает в себя:

- уравнения фильтрации:

$$\rho u = -k_x \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

$$\rho v = -k_y \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (9)$$

- уравнение переноса паровоздушной смеси:

$$\Pi \left(\frac{\partial \rho_n}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_n u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_n v)}{\partial y} \right) = \begin{cases} \beta_{v_1} (p_{n.n.} - p_n), & p_n \geq p_{n.n.}; \\ 0 & p_n < p_{n.n.}; W = 0; \\ \beta_{v_2} (p_{n.n.} - p_n), & p_{n.n.} > p_n; W \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

-уравнение влагосодержания:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \begin{cases} \beta_{v_1} (p_n - p_{n.n.}), & p_n \geq p_{n.n.}; \\ 0 & p_{n.n.} > p_n; W = 0; \\ \beta_{v_2} (p_n - p_{n.n.}), & p_{n.n.} > p_n; W \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

-уравнение теплопроводности в скелете пористого тела:

$$[(1 - \Pi)c_{ск}\rho_{ск} + c_вW] \frac{\partial t_{ск}}{\partial \tau} = (1 - \Pi) \left(\lambda_x \frac{\partial^2 t_{ск}}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t_{ск}}{\partial y^2} \right) + a_v(t - t_{ск}) + r \frac{\partial W}{\partial \tau}; \quad (12)$$

- уравнение переноса энергии паровоздушной смесью:

$$c\Pi \left(\frac{\partial(\rho t)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho t u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho t v)}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + a_v(t_{ск} - t); \quad (13)$$

и следующие соотношения:

$$p = \rho R(t + 273), \quad p_n = \rho_n R_n(t + 273), \quad p = p_n + p_э, \quad (14)$$

где: c – удельная теплоемкость скелета тела, Дж/(кг·°C);

Π – пористость, %;

p – давление паровоздушной смеси, Па;

t – температура °C;

$\rho_{ск}$ – плотность скелета пористого тела, кг/м³;

$\rho_{п.п}$ – плотность пористого тела, кг/м³;

ρ – плотность паровоздушной смеси, кг/м³;

u, v – скорости паровоздушной смеси в направлениях x, y , м/с;

τ – время, с;

β_{v_1}, β_{v_2} – объёмные коэффициенты массообмена, отнесённые к разности

парциальных давлений соответственно в условиях конденсации и испарения, с·м⁻²;

$p_{n.n.}$ – давление насыщения при температуре $t_{ск}$ скелета, Па;

p_n – парциальное давление пара в паровоздушной смеси, Па

λ – коэффициент теплопроводности паровоздушной, Вт/(м·°C);

k_x и k_y – коэффициенты пропорциональности (фильтрации) пакета в направлениях x и y ;

W – количество влаги в единице объема, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $c_{ск}$ – удельная массовая теплоемкость сухого скелета пористого тела, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;
 c_v – удельная массовая теплоемкость влаги, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;
 λ_x и λ_y – коэффициенты теплопроводности скелета пористого тела соответственно в направлениях x и y , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$;
 a_v – объемный коэффициент диффузии;
 r – удельная теплота фазового перехода, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 R – газовая постоянная смеси, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;
 R_n – газовая постоянная пара, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

Вышеприведенная система уравнений позволяет описать процессы тепло-массообмена пористого тела, находящегося во влажном состоянии для разных технологических режимов, но для каждого из них необходимо задавать определенные граничные условия.

Поэтому решение этой системы дифференциальных уравнений в частных производных будет всегда единственным. Так для прессования древесного композиционного материала на порошковом связующем используются краевые условия:

- т.к. для прессования используются непроницаемые поддоны, то скорость смеси направлена по нормали к поверхности;
- для уравнения переноса пара и энергии паровоздушной смеси через торцы пакета вместо граничных условий на непроницаемой поверхности используются вырожденные варианты этих уравнений.

Поскольку аналитическое решение системы ДУЧП (8 – 14) с перечисленными краевыми условиями затруднено, то ее численное решение было выполнено методом конечных разностей (МКР). Для этого была введена равномерная сетка, после чего исходная система уравнений вместе с граничными условиями была записана в конечно-разностной форме.

Реализация полученной системы уравнений осуществлялась в среде MathCAD-12. Решение системы уравнений было рассмотрено для технологического режима прессования композиционного материала, приведенного в таблице 1. Результаты решения приведены на рисунках 4 – 7.

Таблица 1 – Режим прессования древесного композиционного материала

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1.	Температура плит пресса, $^\circ\text{C}$	170
2.	Давление прессования, МПа	2,0
3.	Толщина плиты, мм	16
4.	Тип прессования	плоское, с поддонами на дистанционных планках
5.	Влажность стружки, %	7,0
6.	Количество связующего, м.ч. на 100 м.ч. древесных частиц	15
7.	Тип связующего	порошковое



Рисунок 4 – Изменение температуры во времени в центре прессуемого пакета



Рисунок 6 – Изменение давления во времени в центре прессуемого пакета

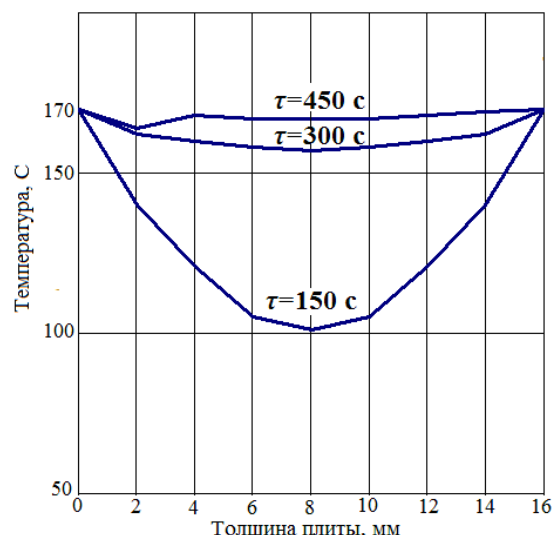


Рисунок 5 – Распределение температуры по сечению пакета в различные моменты времени

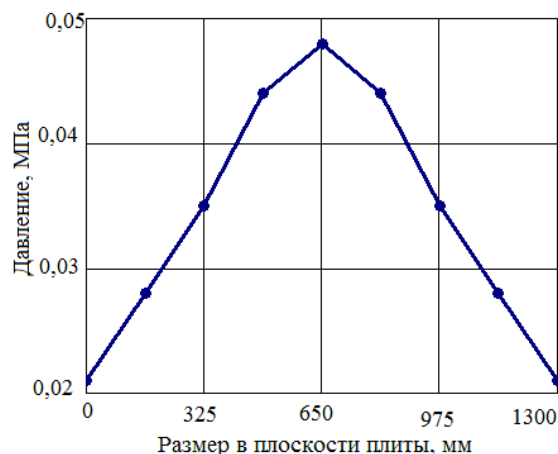


Рисунок 7 – Распределение давления в плоскости плиты

Предлагаемые древесные композиционные материалы планируется использовать в строительстве и отделке помещений с повышенным радиационным фоном (при изготовлении дверных полотен, ширм, экранов, жалюзи, специальной тары и пр.). Для этого необходимо знать их особенности, в частности прочностные характеристики.

В основе теории прогиба тонких пластин лежат следующие гипотезы Кирхгофа:

- срединная плоскость пластины искривляется, но не деформируется;
- любой линейный элемент, перпендикулярный срединной плоскости, остается перпендикулярным к ней и после изгиба, причем длина его не изменяется;
- продольные слои пластины не давят друг на друга ($\sigma_z = 0$).

Величины нормальных и касательных напряжений в пластинах определяются формулами:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{I_x} \cdot z; \quad \sigma_y = \frac{M_y}{I_y} \cdot z, \quad (15)$$

$$\tau_{xz} = \frac{6Q_x}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right); \quad \tau_{yz} = \frac{6Q_y}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right), \quad (16)$$

где: $I_x = \frac{bh^3}{12}$ $I_y = \frac{b^3h}{12}$ – момент инерции для прямоугольной пластины;

M_x, M_y, Q_x, Q_y – изгибающие моменты и поперечные силы, отнесенные к единице длины пластины;

h – толщина пластины;

z – расстояние до нейтрального слоя.

Поведение пластины под нагрузкой описывается уравнением Софи – Жермен:

$$\nabla^2 \nabla^2 f = \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = \frac{1}{D} q(x, y), \quad (17)$$

где: f – прогиб пластины;

$q(x, y)$ – интенсивность распределенной по площади поперечной нагрузки на пластину;

D – цилиндрическая жесткость пластины.

Решить уравнение (17) в аналитической форме возможно при использовании граничных условий закрепления пластины приближенными методами, например методом конечных элементов (МКЭ).

Анализ напряженно-деформированного состояния композиционных материалов «Фанотрен А» и «Фанотрен Б» проводился на компьютерной модели в виде трехслойной пластины. С целью определения прочностных показателей этих материалов были смоделированы образцы, имеющие форму параллелепипеда (рисунок 8): размером $150 \times 50 \times 4$ мм (для «Фанотрен А») и $150 \times 50 \times 9,5$ мм (для «Фанотрен Б»). Модели состоят из слоев А и Б – лущеного березового шпона, причем верхние и нижние слои расположены вдоль пластины, толщина слоев 1,5 мм. Слои В – фольга из сплава Вуда, толщиной 0,3 мм (для «Фанотрен А»), или рентгенозащитный слой (РЗС), толщиной 3 мм (для «Фанотрен Б»).

Моделирование напряженно-деформированного состояния производилось в программе ANSYS с использованием конечного элемента SHELL 181. Модель закреплялась за два нижних противоположных ребра, причем одно ребро фиксировалось по трем координатам, а второе по двум (таким образом имитировалась скользящая опора), нагрузка прикладывалась к группе узлов в центре и составляла 380 Н (для «Фанотрен А») и 290 Н (для «Фанотрен Б»).

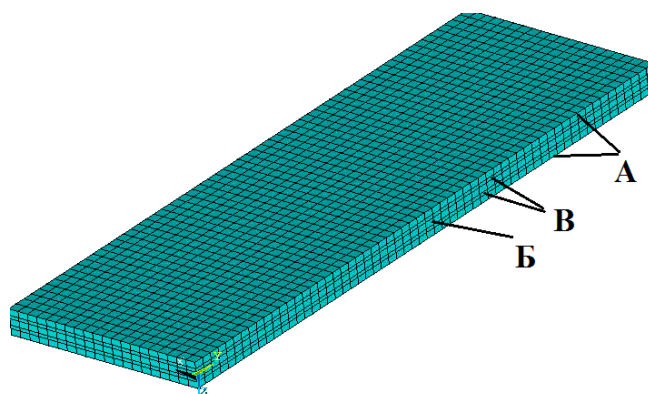


Рисунок 8 – Оболочечная конечно-элементная модель материала

Результаты моделирования в виде полей напряжений по фон Мизису представлены на рисунке 9, а расчетные поля перемещений – на рисунке 10.

а)

б)

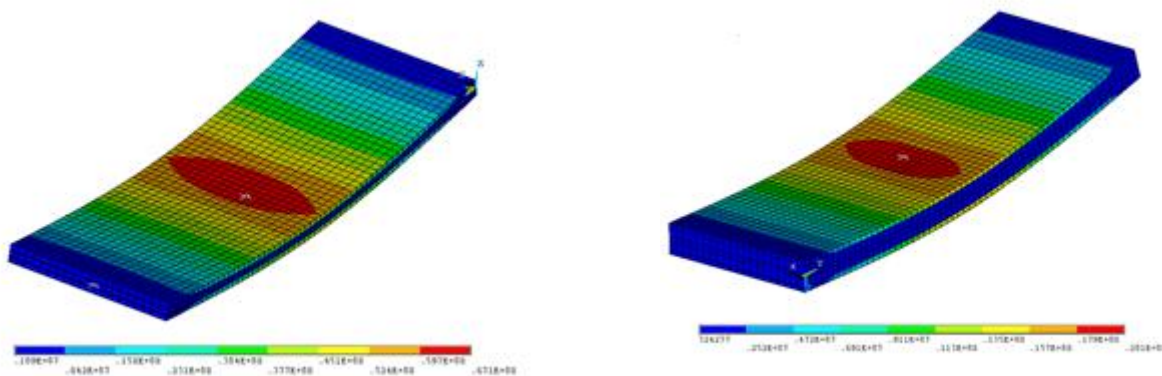


Рисунок 9 - Поле напряжений материала: а) «Фанотрен А», максимальное в образце 67,1 МПа; б) материала «Фанотрен Б», максимальное в образце 20,1 МПа

а)

б)

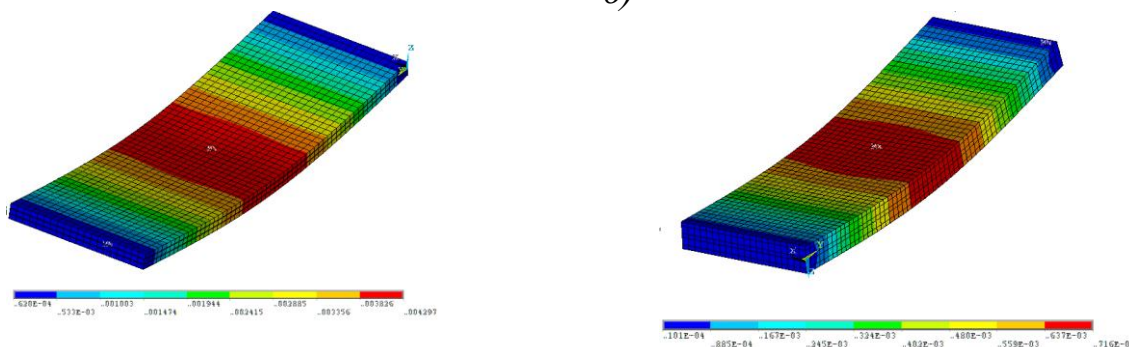


Рисунок 10 – Поле перемещения материала: а) «Фанотрен А», максимальный прогиб в образце 4,3 мм; б) «Фанотрен Б», максимальный прогиб в образце 0,7 мм

Полученные модели применялись для объяснения перераспределения напряжений и прогибов в образцах для различных толщин армирующих слоев.

Анализ напряженно-деформированного состояния материала «Плитотрен» проводился на компьютерной модели в виде однородной пластины. Для определения прочностных показателей была создана объемная конечно-элементарная модель. Образец имеет форму параллелепипеда размером

150×50×13 мм, нагрузка составляла 630 Н и прикладывалась к группе узлов в центре. В качестве оболочного элемента в модели использовался восьмиузловой кубический элемент, закрепление модели выполнялось аналогично выше-описанному.

Результаты моделирования в виде полей напряжений по фон Мизису представлены на рисунке 11, а расчетные поля перемещений – на рисунке 12.

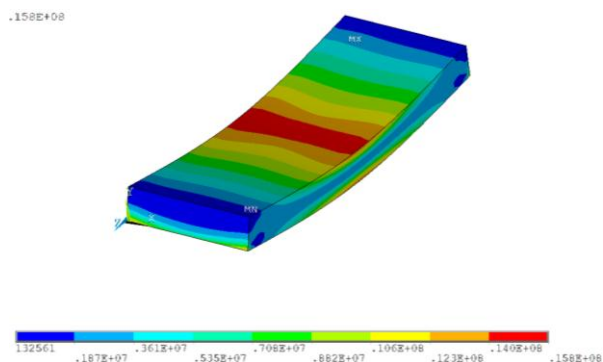


Рисунок 11 - Поле напряжений материала «Плитотрен», максимальное в образце 15 МПа

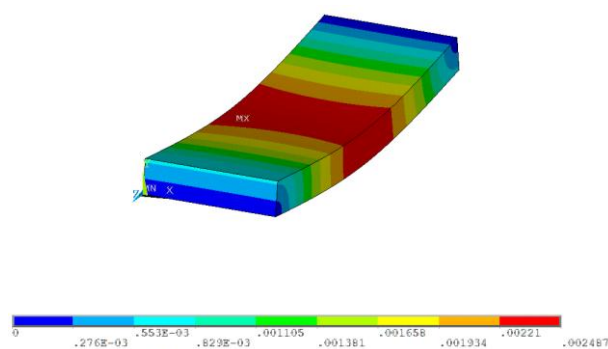


Рисунок 12 - Поле перемещения материала «Плитотрен», максимальный прогиб в образце 2,5 мм

Полученные модели применялись для объяснения перераспределения напряжений и прогибов в образцах различной толщины.

В третьей главе рассматриваются направления исследований, содержатся основные методические положения проведения экспериментов и обработки их результатов, приводятся характеристики используемых материалов, применяемого оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры.

В исследованиях для создания конструкции слоистых материалов использовался шпон березовый лущеный, толщиной 1,5 мм, удовлетворяющий по качеству ГОСТ 99-75 «Шпон лущеный». В качестве армирующих слоев: для материала «Фанотрен А» – фольга толщиной $0,3 \pm 0,02$ мм, прокатанная из сплава Вуда (ТУ 6-09-4064-87); для материала «Фанотрен Б» – РЗС, в основе которых использован термоскрепленный синтепон с поверхностной плотностью 300 г/м^2 (ТУ-6-13-0204456-40-90) пропитанный композицией на основе сульфата бария (ГОСТ 3158-75), поливинилацетатного клея «Иоваколь» D3/D4.10270 и дистиллированной воды (ГОСТ 6709-72). Связующим в конструкции являлся поливинилацетатный клей «Иоваколь» D3/D4.10270.

Для создания плитных материалов использовались древесные частицы влажностью $6 \div 8 \%$, имеющие следующие размеры: для материала «Плитотрен» - древесная стружка толщиной $0,2 \div 0,4$ мм, шириной $3,5 \div 5$ мм и длиной $4,5 \div 7$ мм, порода древесины в основном – сосна, имеющая ситовый состав: 10 - 5 мм – 18%, 5 - 2 мм – 60%, 2 - 0,25 мм – 21%, древесная пыль – 1%; для материала «DS-1» - опилки, размером менее 2 мм, имеющие ситовый состав: 2 - 1 – 20%, 1 - 0,25 – 25%, древесная пыль - 55% (порода древесины не имеет значения, так как древесина, переработанная в мелкую фракцию, теряет свои свойства).

В качестве связующего использовались: для материала «Плитотрен» – карбамидоформальдегидная смола КФ-МТ-15 (М) (ТУ 2423-003-79102376-2006) и отвердитель - хлористый аммоний (ГОСТ 2210-73); для материала «DS-1» – порошковый клей «Kaurit Leim 122 Pulver» (Германия). Наполнителем в обеих конструкциях являлся сульфат бария.

Оценка физико-механических свойств предлагаемых материалов проводилась в соответствии с ГОСТ 9621-72, ГОСТ 9625-87, ГОСТ 9624-2009, ГОСТ 9622-87, ГОСТ 10634-88, ГОСТ 10635-88, ГОСТ 10634-88, ГОСТ 11842-76, ГОСТ 11843-76, ГОСТ 9012-59, ГОСТ 276787-88, ГОСТ 16483.14-72.

Рентгенозащитные свойства предлагаемых материалов оценивались при помощи величины свинцового эквивалента. Для этого через полученные образцы и свинцовую пластину толщиной 1 мм пропускали рентгеновские лучи рентгеновским аппаратом при разных режимах экспозиции. Способность полученного рентгенозащитного слоя пропускать рентгеновские лучи оценивали по рентгенопрозрачности и фотометрической контрастности изображения на рентгенограмме с помощью люксметра.

Способность сплава Вуда, находящегося в расплавленном состоянии, смачивать поверхность древесного субстрата оценивалось величиной «краевого угла смачивания»; исследование распределения сплава по толщине шпона при создании конструкции материала «Фанотрен А» осуществлялось методом исследования структуры порового пространства и методом электронного сканирования. Исследование внутренней структуры материалов «Плитотрен» и «DS-1» осуществлялось методом электронной микросъемки.

Полученные опытные данные оценивались посредством первичной обработки результатов эксперимента методами математической статистики. Проверка однородности дисперсии опытов проводилась по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась критерием Стьюдента, адекватность модели – критерием Фишера.

В четвертой главе рассмотрены вопросы формирования древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами на основе шпона.

Приводятся результаты исследований влияния шероховатости поверхности шпона на смачивающую способность сплав Вуда, находящегося в расплавленном состоянии. В ходе исследований выявлено, что сплав Вуда, находящийся в расплавленном состоянии не смачивает поверхность березового лущеного шпона, поэтому достичь контактного взаимодействия между ними в процессе формирования материала «Фанотрен А» можно за счет действия сил механической адгезии.

Для определения режимных параметров формирования материала «Фанотрен А» постановку эксперимента осуществляли по плану B_3 (Бокса) для трех переменных. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 13. Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования приведены в таблице 2, наименование постоянных факторов и их значения приведены в таблице 3.

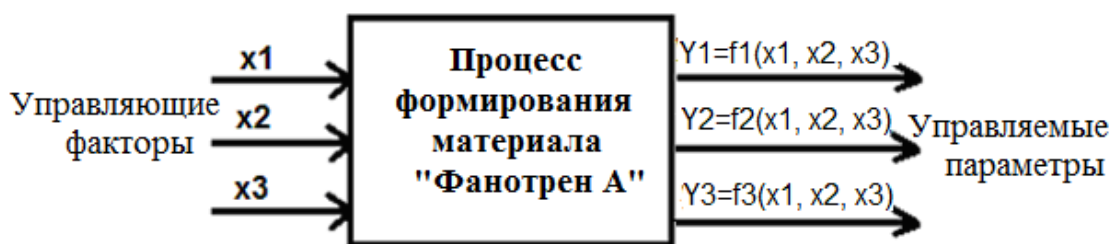


Рисунок 13 – Схема проведения эксперимента по определению физико-механических свойств материала «Фанотрен А»

Таблица 2 – Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	Пере- мен- ные	Значения на уровнях варьирования			Шаг варьирования
			нижнем	основном	верхнем	
1.	Шероховатость поверхности шпона, мкм	x_1	60	90	120	30
2.	Толщина материала, мм	x_2	3,5	4,0	4,5	0,5
3.	Продолжительность прессования, мин	x_3	4	5	6	1

Таблица 3 – Наименование постоянных факторов в эксперименте и их значения

№ п/п	Наименование фактора	Значение
1.	Температура плит пресса, °С	100 ± 5
2.	Удельное давление прессования, МПа	$1,5 \pm 0,1$
3.	Продолжительность охлаждения пакета под давлением, мин	15 ± 2
4.	Толщина шпона, мм	$1,5 \pm 0,1$
5.	Влажность шпона, %	6 ± 2
6.	Толщина фольги, мм	$0,3 \pm 0,02$
7.	Количество листов шпона в конструкции, шт.	3
8.	Размеры материала, мм: - длина - ширина	200 ± 1 200 ± 1
9.	Продолжительность технологической выдержки, ч	24
10.	Тип прессования	с дистанционными планками

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построены следующие математические модели:

$$y_1 = 0,446 - 0,071x_1 - 0,064x_2 + 0,024x_3 - 0,031x_1^2 - 0,022x_2^2 - 0,043x_3^2 + 0,009x_1x_2 - 0,052x_1x_3 - 0,024x_2x_3; \quad (18)$$

$$y_2 = 71,3 - 4,475x_1 - 3,861x_2 + 7,322x_3 - 1,531x_1^2 - 2,997x_2^2 - 2,599x_3^2 + 0,423x_1x_2 - 0,319x_1x_3; \quad (19)$$

$$y_3 = 56,2 - 2,252x_1 - 2,094x_2 + 4,25x_3 - 1,814x_2^2 - 1,022x_3^2 + 0,335x_1x_2. \quad (20)$$

где: y_1 – предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа;

y_2 – предел прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев, МПа;
 y_3 – предел прочности при растяжении вдоль волокон, МПа.

Графическая интерпретация полученных результатов приводится на рисунках 14 – 16.

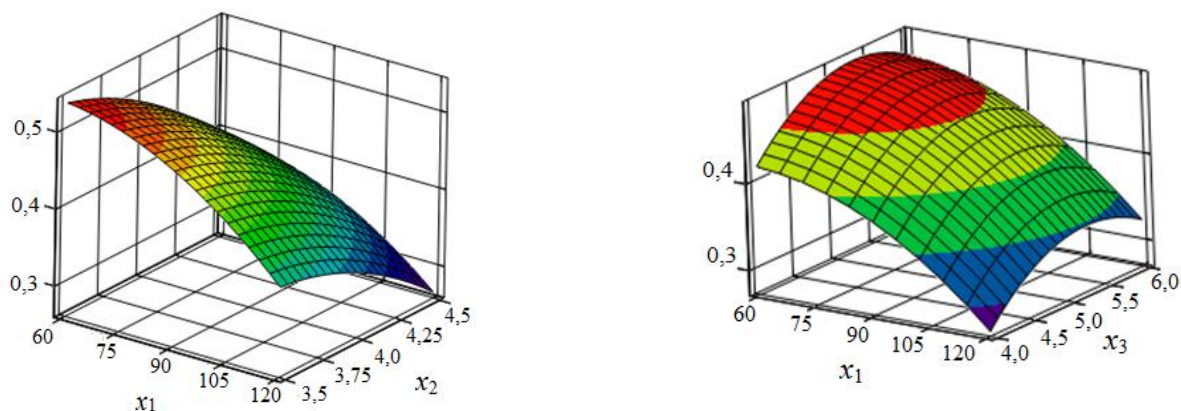


Рисунок 14 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при скалывании): x_1 – шероховатость поверхности шпона; x_2 – толщина материала; x_3 – продолжительность прессования

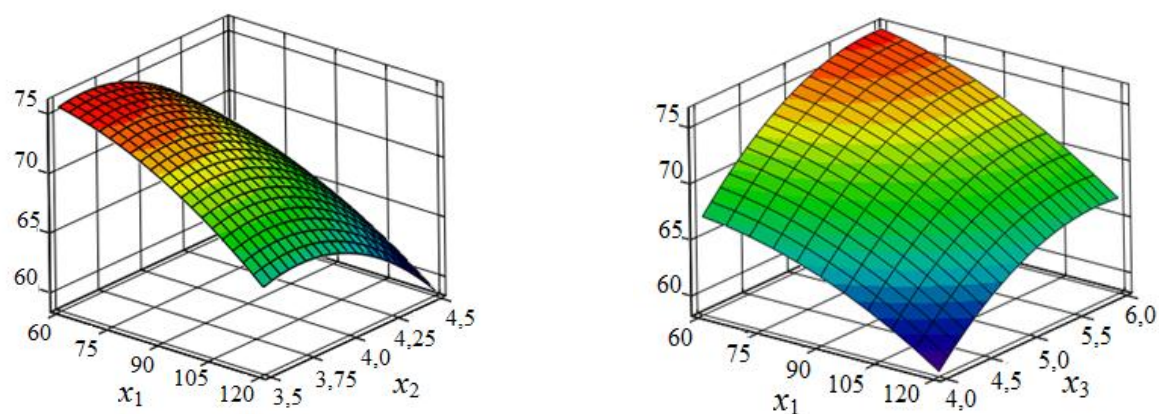


Рисунок 15 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при статическом изгибе): x_1 – шероховатость поверхности шпона; x_2 – толщина материала; x_3 – время прессования

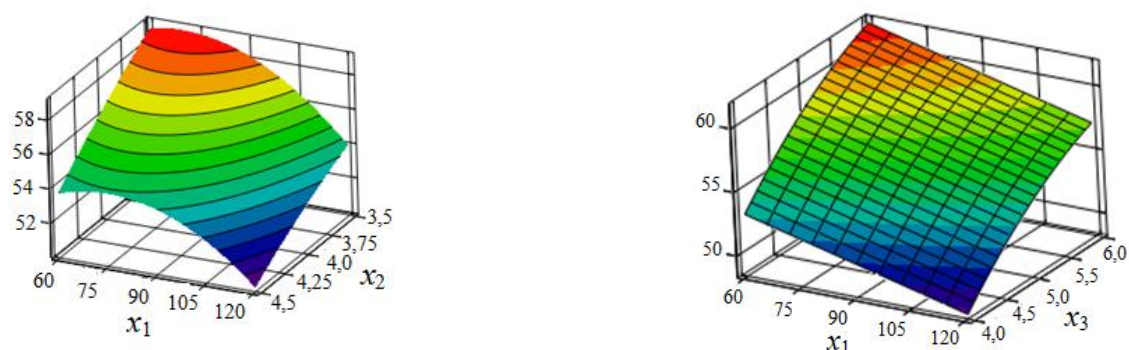


Рисунок 16 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при растяжении): x_1 – шероховатость поверхности шпона; x_2 – толщина материала; x_3 – время прессования

Вышеприведенные математические модели использовались для нахождения оптимальных режимных параметров прессования материала «Фанотрен А».

Задача оптимизации была поставлена следующим образом:

а) целевая функция для определения максимального значения предела прочности:

- при скалывании по клеевому слою (W_1):

$$W_1 = 0,446 - 0,071x_1 - 0,064x_2 + 0,024x_3 - 0,031x_1^2 - 0,022x_2^2 - 0,043x_3^2 + 0,009x_1x_2 - 0,052x_1x_3 - 0,024x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (21)$$

- при статическом изгибе вдоль волокон наружных слоев (W_2):

$$W_2 = 71,3 - 4,475x_1 - 3,861x_2 + 7,322x_3 - 1,531x_1^2 - 2,997x_2^2 - 2,599x_3^2 + 0,423x_1x_2 - 0,319x_1x_3 \rightarrow \max; \quad (22)$$

- при растяжении вдоль волокон (W_3):

$$W_3 = 56,2 - 2,252x_1 - 2,094x_2 + 4,25x_3 - 1,814x_2^2 - 1,022x_3^2 + 0,335x_1x_2 \rightarrow \max. \quad (23)$$

б) для целевых функций (21–23) справедлива следующая система ограничений:

$$-1 \leq x_1 \leq 1; \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1. \quad (24)$$

Для решения оптимизационной задачи применена технология оптимизации *Microsoft Excel* встроенной надстройки «Поиск решения». Оптимизация осуществлялась методом обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Для решения компромиссной задачи использован метод условного центра масс.

Исследование распределения сплава Вуда по толщине шпона материала «Фанотрен А» проводилось методом исследования структуры порового пространства. Образцы помещались в чашу Петри при температуре 26 ± 4 °С и влажности $80 \pm 20\%$, в которой находилась культура грибка *Coniophora Cerebella*. Через 2 – 4 недели полученный слепок очищался от продуктов жизнедеятельности культуры грибка путем погружения в воду и изучался с применением бинокулярной лупы.

Для количественной оценки структурных элементов (толщины сплошного армирующего слоя и глубины проникновения адгезива в толщу шпона) исследования проводились методом электронного сканирования. Для этого из полученных образцов материала были выполнены микросрезы на микротоме (толщина среза составляла $0,2 \pm 0,01$ мм). Полученные срезы укладывались между предметными стеклами и помещались в электронный сканер (рисунок 17).

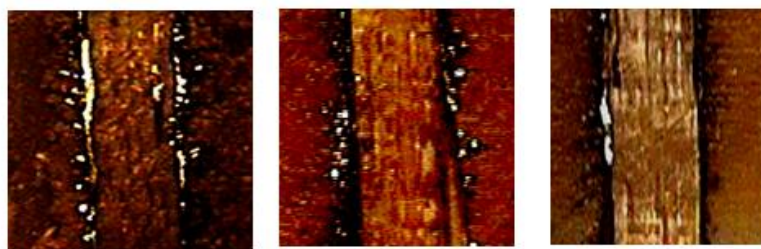


Рисунок 17 – Сканы микросрезов по толщине материала «Фанотрен А»

Материал «Фанотрен А» отличается оригинальностью конструкции, т.к. применяемая в качестве армирующего слоя фольга одновременно является как адгезивом, так и рентгенозащитным слоем. Недостатком материала является его дороговизна и трудоемкость получения листового прокатка для армирования материала. С целью устранения этих недостатков предложена его модификация – материал «Фанотрен Б». Он выполнен на основе березового шпона, а в основе конструкции рентгенозащитных слоев (РЗС) применяется волокнистый материал (типа синтепон), наполненный рентгенозащитной пропитывающей композицией, состоящей из сульфата бария, ПВА клея и дистиллированной воды. В процессе исследований изучено влияние этих компонентов на рентгенозащитные свойства РЗС.

Для исследования выбран симплексно-центроидный план трехкомпонентной системы. Схема проведения эксперимента изображена на рисунке 18. Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования представлены в таблице 4, наименование постоянных факторов и их значения приведены в таблице 5.

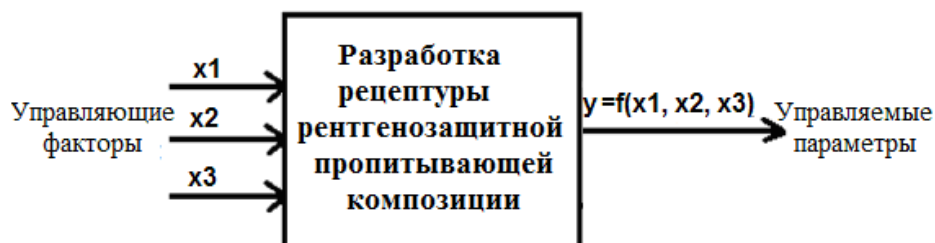


Рисунок 18 – Схема проведения эксперимента разработки рецептуры рентгенозащитной пропитывающей композиции

Таблица 4 – Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	пере- менные	Значения на уровнях варьирования			
			нижний		верхний	
			нату- ральное	нормали- зованное	нату- ральное	нормали- зованное
1.	Содержание минерального наполнителя, %.	x_1	40	-1	60	0
2.	Содержание связующего, %	x_2	25	-1	45	0
3.	Содержание воды, %.	x_3	15	-1	35	0

Таблица 5 – Наименование постоянных факторов в эксперименте и их значения

№п/п	Наименование фактора	Значение
1.	Продолжительность перемешивания композиции, мин	5 ± 1
2.	Продолжительность сушки РЗС, ч	48 ± 1
3.	Температура плит пресса, °С	50 ± 2
4.	Продолжительность уплотнения РЗС, мин	5 ± 1
5.	Удельное давление прессования, МПа	$1,5 \pm 0,1$
6.	Толщина РЗС, мм	$3 \pm 0,1$

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построена математическая модель:

$$y = 0,309x_1 + 0,176x_2 + 0,142x_3 + 0,084x_1x_2 - 0,075x_1x_3 - 0,125x_2x_3 + 0,486x_1x_2x_3. \quad (25)$$

где y – свинцовый эквивалент РЗС, мм/Рв мм.

Проекция поверхности отклика на симплексе для пропитывающей композиции приведены на рисунке 19.

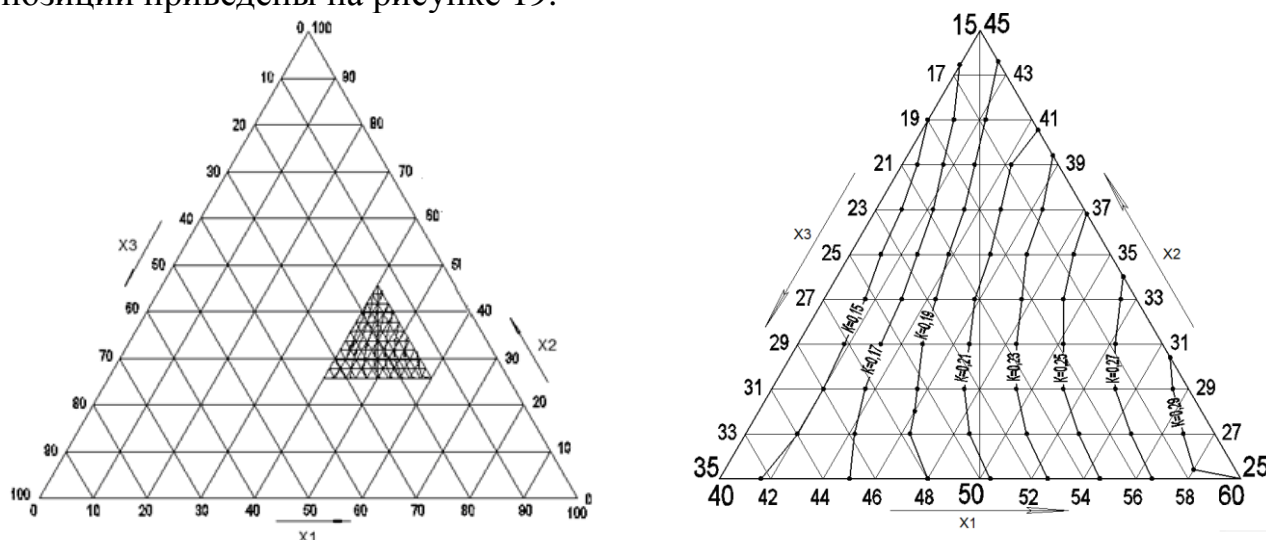


Рисунок 19 – Проекция поверхности отклика на симплексе
Для пропитывающей композиции: изолинии – величина свинцового эквивалента

Для определения режимных параметров прессования материала «Фанотрен Б» постановку эксперимента осуществляли по плану В₃ (Бокса) для трех независимых переменных. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 20. Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования приведены в таблице 6, наименование постоянных факторов и их значения приведены в таблице 7.

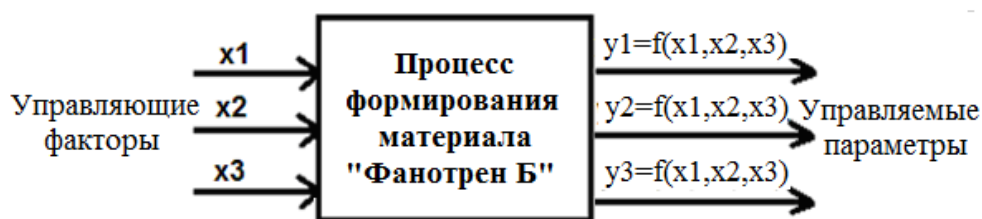


Рисунок 20 - Схема проведения эксперимента по определению физико-механических свойств материала «Фанотрен Б»

Таблица 6 - Наименование управляющих факторов в эксперименте и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	Пере- мен- ные	Значения на уровнях варьирования			Шаг варьи- рования
			нижнем	основном	верхнем	
1.	Расход клея, г/м ²	x_1	150	175	200	25
2.	Температура плит пресса, °С	x_2	50	60	70	10
3.	Время прессования, мин.	x_3	6	7	8	1

Таблица 7 – Наименование постоянных факторов в эксперименте и их значения

№ п/п	Наименование фактора	Значение
1.	Содержание компонентов в пропитывающей композиции, %: - минеральный наполнитель - связующее - вода	50 30 20
2.	Толщина шпона, мм	1,5±0,1
3.	Влажность шпона, %	6± 2
4.	Толщина РЗС, мм	3±0,1
5.	Количество листов шпона в конструкции, шт.	3
6.	Удельное давление прессования, МПа	1,5±0,1
7.	Размеры материала, мм: - длина - ширина	200 ± 1 200 ± 1
8.	Продолжительность открытой выдержки, мин	6±1

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построены следующие математические модели:

$$y_1 = 1,21 - 0,013x_1 - 0,085x_2 + 0,18x_3 - 0,27x_1^2 - 0,05x_2^2 - 0,09x_3^2 + 0,01x_1x_2 - 0,005x_1x_3 - 0,004x_2x_3; \quad (26)$$

$$y_2 = 18,1 - 0,04x_1 - 1,54x_2 + 0,58x_3 + 0,31x_1^2 + 1,73x_2^2 - 3,57x_3^2 - 0,32x_1x_2 - 1,72x_1x_3 + 0,52x_2x_3; \quad (27)$$

$$y_3 = 31,6 - 2,9x_1 + 1,94x_2 + 3,24x_3 - 2,74x_1^2 - 2,07x_2^2 - 1,22x_3^2 - 0,58x_1x_2 + 1,63x_1x_3 - 0,33x_2x_3. \quad (28)$$

где: y_1 – предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа;

y_2 – предел прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев, МПа;

y_3 – предел прочности при растяжении вдоль волокон, МПа.

Графическая интерпретация полученных результатов приводится на рисунках 21 – 23.

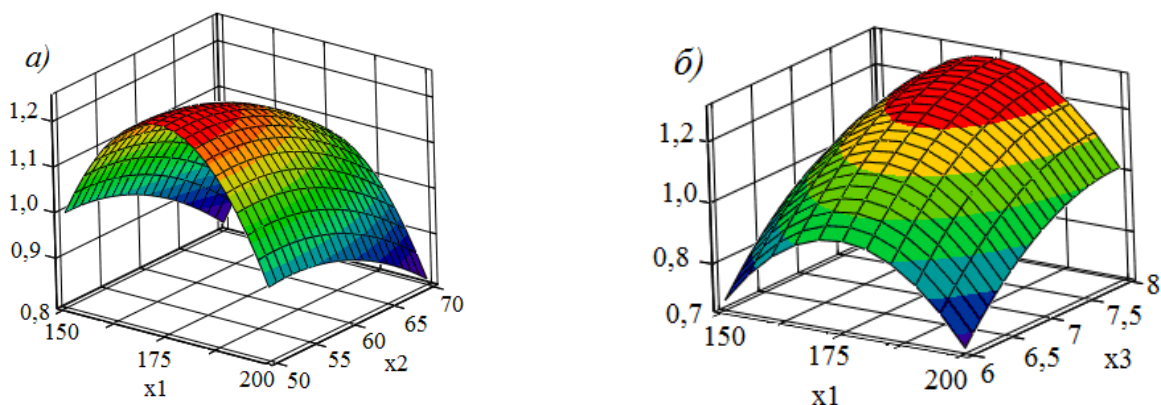


Рисунок 21 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при скалывании): x_1 – расход клея; x_2 – температура плит пресса; x_3 – продолжительность прессования

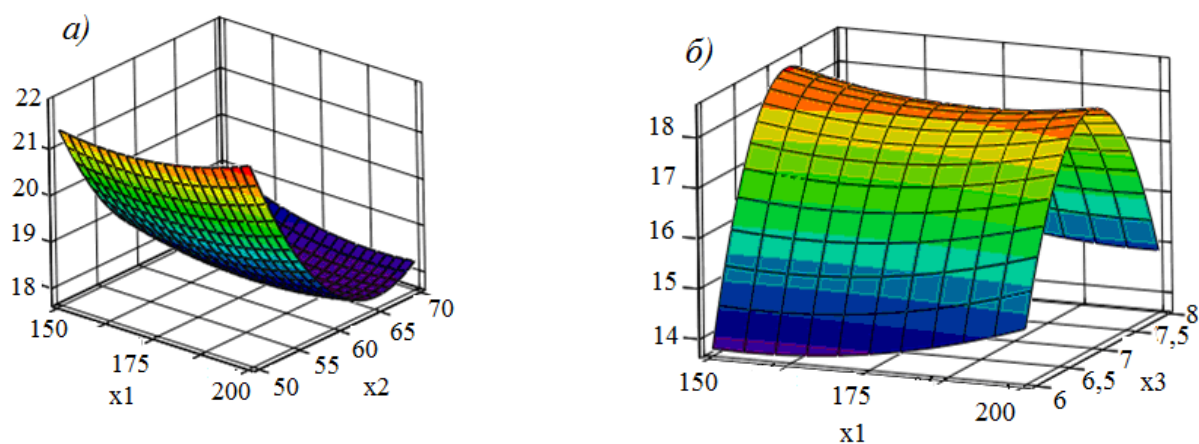


Рисунок 22 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при статическом изгибе): x_1 – расход клея; x_2 – температура плит пресса; x_3 – продолжительность прессования

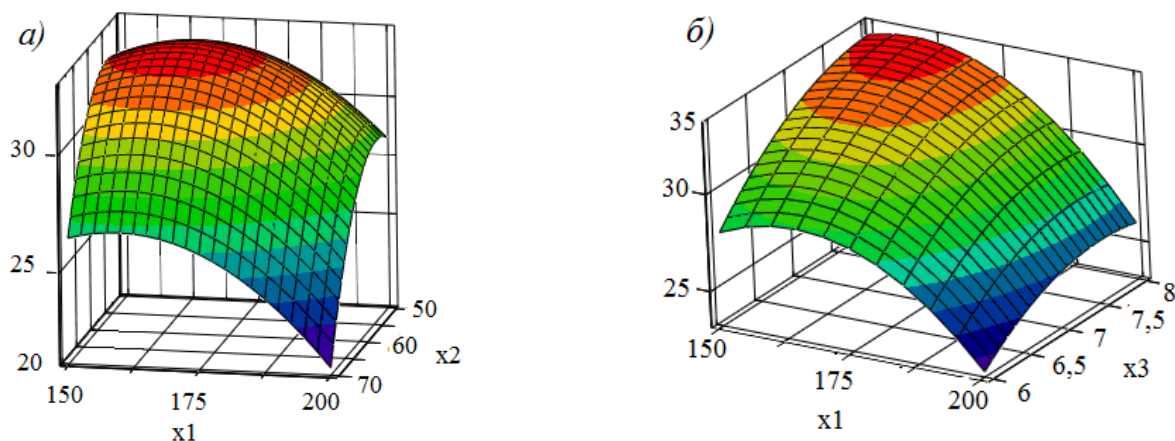


Рисунок 23 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при растяжении): x_1 – расход клея; x_2 – температура плит пресса; x_3 – продолжительность прессования

Для определения рациональных значений формирования материала «Фанотрен Б» задача оптимизации была поставлена аналогично вышеприведенной. Оптимизация осуществлялась методом ОПГ, для решения компромиссной задачи использован метод условного центра масс.

Наименование и значения постоянных и управляющих факторов при проведении эксперимента по оценке рентгенозащитных свойств материалов «Фанотрен А» и «Фанотрен Б» приведены соответственно в таблицах 8 и 9. Результаты эксперимента представлены на рисунке 24.

Таблица 8 – Постоянные факторы в эксперименте

№п/п	Наименование фактора	Значение
1.	Размеры образца, мм	
	- длина	50±1
	- ширина	50±1
2.	Режим экспозиции:	
	- время, с	0,06
	- сила тока, мА	40

Таблица 9 – Управляющие факторы в эксперименте

№п/п	Наименование фактора	Значение
1.	Образец испытываемого материала толщиной, мм:	
	- свинец	1,05
	- свинец	0,75
	- просвинцованная резина	5
	- «Фанотрен А»	$3 \pm 0,1$
	- «Фанотрен Б»	$9,5 \pm 0,1$
2.	Напряжение на трубке, кВ	40
		60
		75

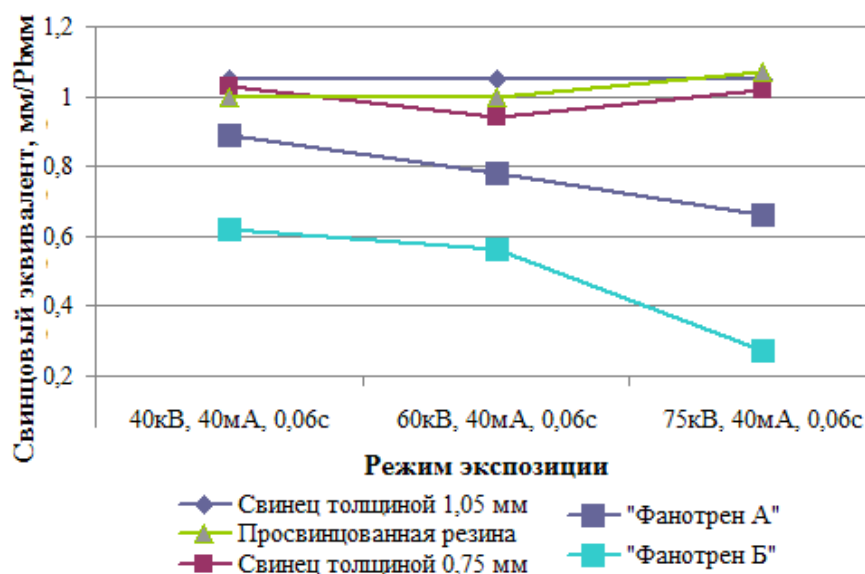


Рисунок 24 – Рентгенозащитные свойства материалов в зависимости от режима экспозиции

В пятой главе рассматриваются вопросы формирования древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами на основе древесных частиц «Плитлтрэн» и «DS-1».

Схема проведения эксперимента по исследованию влияния количества наполнителя (сульфата бария) в древесно-клеевой композиции на физико-механические свойства материалов приведена на рисунке 25. Состав древесно-клеевой композиции приведен в таблице 10. Постоянные факторы при проведении эксперимента представлены в таблице 11.

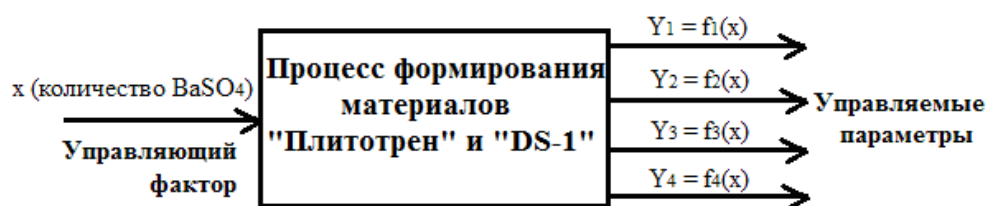


Рисунок 25 – Схема проведения эксперимента по определению влияния количества наполнителя на физико-механические свойства материалов: y_1 - ударная вязкость, y_2 - твердость по Бринеллю, y_3 - разбухание по толщине, y_4 - предел прочности при статическом изгибе

Таблица 10 – Состав древесно-клеевой композиции древесных композиционных материалов «Плитотрен» и «DS-1»

№ п/п	Наименование компонента	Содержание компонентов в опытах, %				
1.	Связующее	25	25	25	25	25
2.	Древесные частицы	75	65	55	45	35
3.	Минеральный наполнитель	0	10	20	30	40
Всего:		100				

Таблица 11 – Постоянные факторы в эксперименте

№п/п	Наименование фактора	Показатели для материала	
		«Плитортен»	«DS-1»
1.	Температура плит пресса, °C	160 ± 5	
2.	Давление прессования, МПа	1,8±0,1	
3.	Толщина материала, мм	13 ± 0,1	16±0,1
4.	Влажность стружки, %	6±1	
5.	Время прессования, мин	6 ± 1	7± 1
6.	Расчетная плотность плиты, кг/м ³	950	1100
7.	Время технологической выдержки, ч	24	

По результатам проведенной статистической обработки экспериментальных данных построены математические модели и графические зависимости, приведенные на рисунках 26 – 29.



Рисунок 26 – Зависимость ударной вязкости материалов от содержания наполнителя

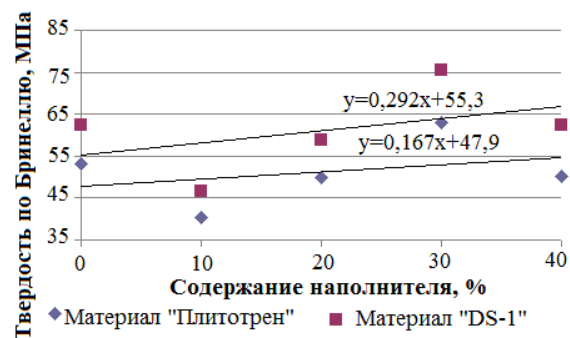


Рисунок 27 – Зависимость твердости по Бринеллю материалов от содержания наполнителя

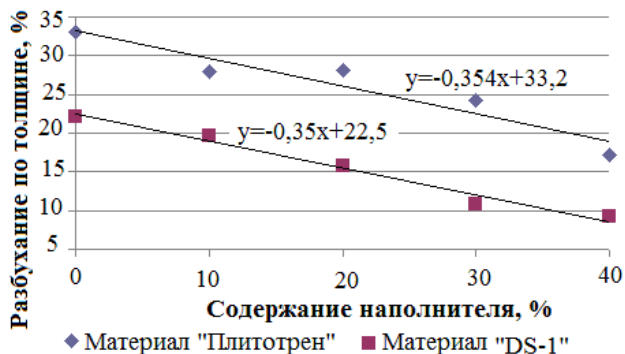


Рисунок 28 – Зависимость разбухания по толщине материалов от содержания наполнителя

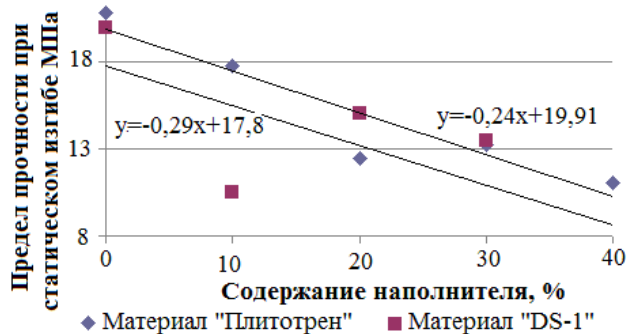


Рисунок 29 – Зависимость предела прочности при статическом изгибе материалов от содержания наполнителя

Схема проведения эксперимента по оптимизации процесса формирования материалов «Плитотрен» и «DS-1» представлена на рисунке 30. Управляющие факторы приведены в таблице 12.

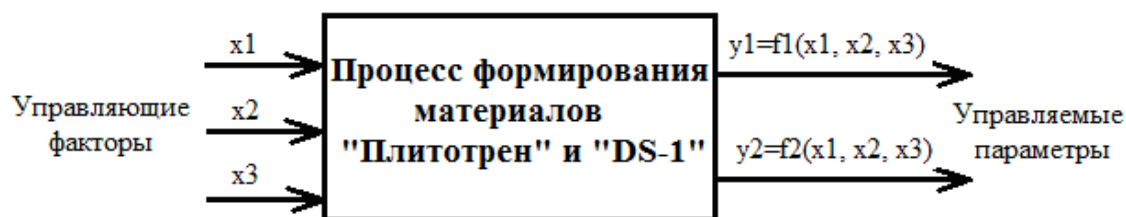


Рисунок 30 – Схема проведения эксперимента по оптимизации процесса формирования материалов «Плитотрен» и «DS-1»

Таблица 12 – Управляющие факторы в эксперименте по оптимизации процесса формирования материалов «Плитотрен» и «DS-1»

№ п/п	Наименование фактора	Пере- менные	Значения на уровнях варьирования			Шаг варьи- рова- ния
			нижнем	основном	верхнем	
материал «Плитотрен»						
1.	Содержание наполнителя, %	x_1	20	30	40	10
2.	Содержание связующего, %	x_2	20	25	30	5
3.	Плотность материала, кг/м ³	x_3	850	950	1050	100
материал «DS-1»						
1.	Содержание наполнителя, %	x_1	20	30	40	10
2.	Содержание связующего, %	x_2	20	25	30	5
3.	Плотность материала, кг/м ³	x_3	1000	1100	1200	100

По результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных построены следующие математические модели:

- для материала «Плитотрен»:

$$y_1^{(1)} = 9,2 + 1,97x_1 - 0,69x_2 + 0,08x_3 + 0,77x_1^2 + 0,52x_2^2 - 0,19x_3^2 + 0,31x_1x_2 - 0,19x_1x_3 - 0,36x_2x_3; \quad (29)$$

$$y_2^{(1)} = 13,55 - 1,64x_1 + 2,39x_2 - 1,49x_3 - 1,75x_1^2 - 2,79x_2^2 + 0,4x_3^2 - 0,31x_1x_2 - 0,19x_1x_3 - 0,36x_2x_3. \quad (30)$$

- для материала «DS-1»:

$$y_1^{(2)} = 10,7 + 3,3x_1 - 0,53x_2 - 0,07x_3 + 1,64x_1^2 - 0,5x_2^2 - 0,1x_3^2 + 0,09x_1x_2 - 0,18x_1x_3 - 0,08x_2x_3; \quad (31)$$

$$y_2^{(2)} = 13,5 - 1,46x_1 + 1,61x_2 + 0,56x_3 - 0,73x_1^2 - 1,78x_2^2 + 0,47x_3^2 - 0,36x_1x_2 + 0,16x_1x_3 + 0,56x_2x_3. \quad (32)$$

где: $y_1^{(1)}$, $y_1^{(2)}$ - соответственно разбухание по толщине материалов «Плитотрен» и «DS-1», %;

$y_2^{(1)}$, $y_2^{(2)}$ - соответственно предел прочности при статическом изгибе

материалов «Плитотрен» и «DS-1», МПа.

Графическая интерпретация полученных результатов приводится на рисунках 31 – 34.

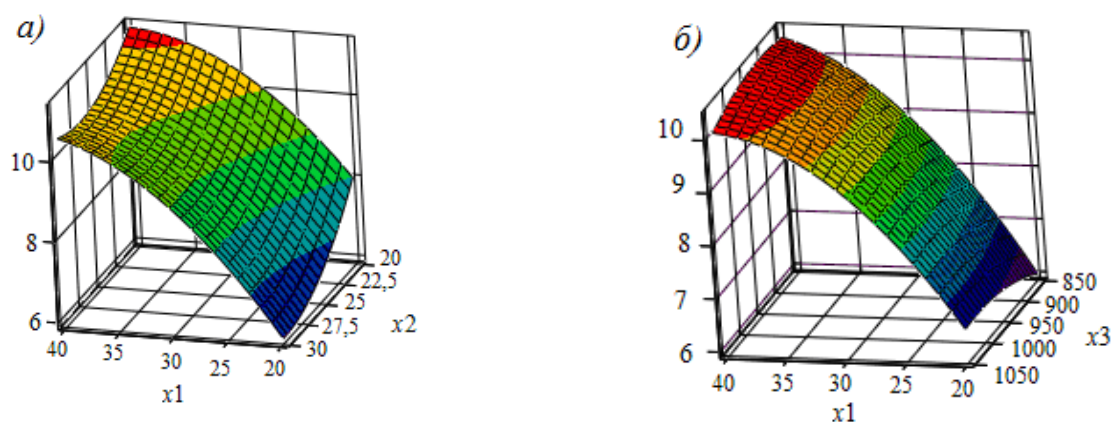


Рисунок 31 – Графическая интерпретация (выходной параметр – разбухание по толщине материала «Плитотрен»): x_1 – содержание наполнителя; x_2 – содержание клея; x_3 – плотность материала

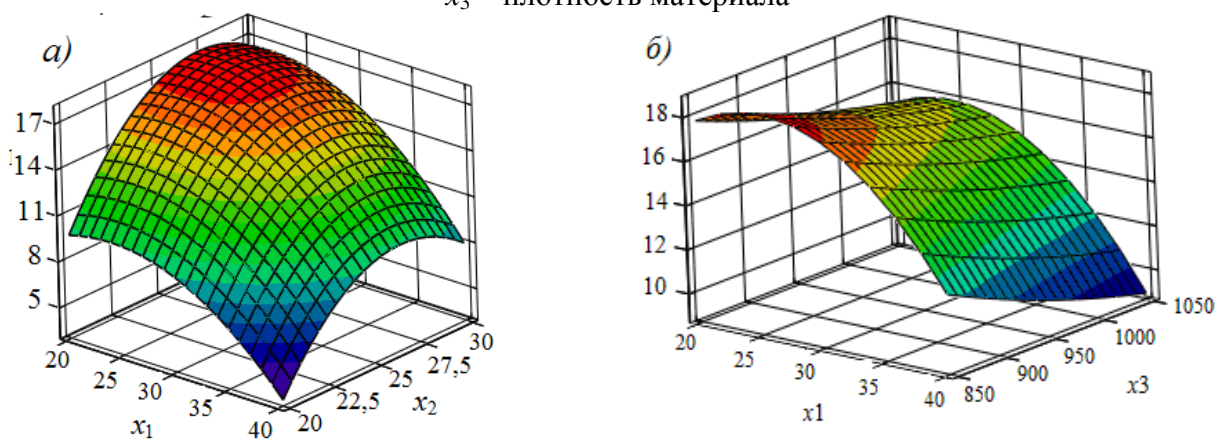


Рисунок 32 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при статическом изгибе материала «Плитотрен»): x_1 – содержание наполнителя; x_2 – содержание клея; x_3 – плотность материала

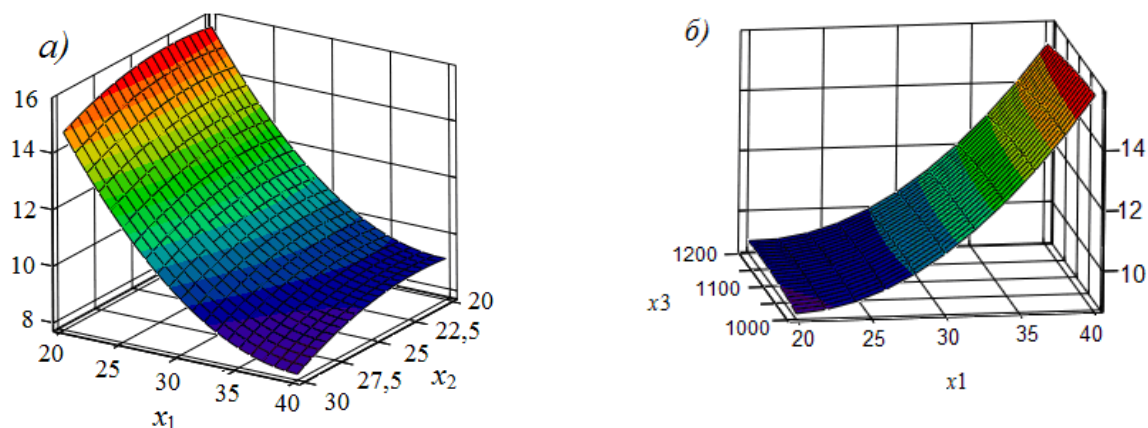


Рисунок 33 – Графическая интерпретация (выходной параметр – разбухание по толщине материала «DS-1»): x_1 – содержание наполнителя; x_2 – содержание клея; x_3 – плотность материала

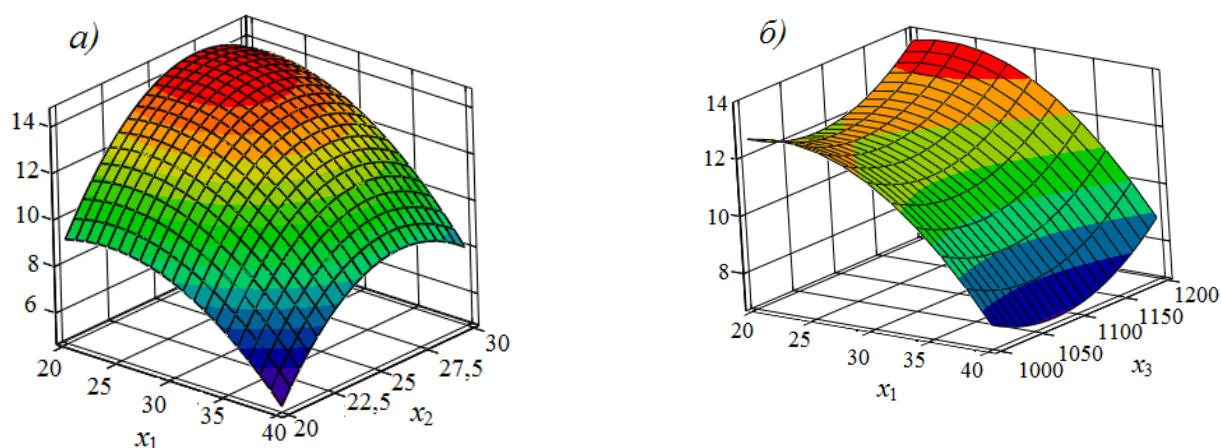


Рисунок 34 – Графическая интерпретация (выходной параметр – предел прочности при статическом изгибе материала «DS-1»): x_1 – содержание наполнителя; x_2 – содержание клея; x_3 – плотность материала

Полученные уравнения регрессии использовались для формирования оптимизационных моделей по определению максимального значения предела прочности материалов при статическом изгибе:

- для материала «Плитотрен» целевая функция имеет вид:

$$W^{(1)} = 13,55 - 1,64x_1 + 2,39x_2 - 1,49x_3 - 1,75x_1^2 - 2,79x_2^2 + 0,4x_3^2 - 0,31x_1x_2 - 0,19x_1x_3 - 0,36x_2x_3 \rightarrow \max \quad (33)$$

при ограничениях:

$$9,2 + 1,97x_1 - 0,69x_2 + 0,08x_3 + 0,77x_1^2 + 0,52x_2^2 - 0,19x_3^2 + 0,31x_1x_2 - 0,19x_1x_3 - 0,36x_2x_3 \leq 10 \quad (34)$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1; \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1. \quad (35)$$

- для материала «DS-1» целевая функция имеет вид:

$$W^{(2)} = 13,5 - 1,46x_1 + 1,61x_2 + 0,56x_3 - 0,73x_1^2 - 1,78x_2^2 + 0,47x_3^2 - 0,36x_1x_2 + 0,16x_1x_3 + 0,56x_2x_3 \rightarrow \max \quad (36)$$

при ограничениях:

$$10,7 + 3,3x_1 - 0,53x_2 - 0,07x_3 + 1,64x_1^2 - 0,5x_2^2 - 0,1x_3^2 + 0,09x_1x_2 - 0,18x_1x_3 - 0,08x_2x_3 \leq 10; \quad (37)$$

$$-1 \leq x_1 \leq 1; \quad -1 \leq x_2 \leq 1; \quad -1 \leq x_3 \leq 1. \quad (38)$$

Оптимизация осуществлялась методом ОПГ встроенной надстройки *Microsoft Excel* «Поиск решения».

Исследования рентгенозащитных свойств материалов проводились аналогично вышеприведенным. Значения постоянных факторов в эксперименте приведены в таблице 8, значения управляющих факторов – в таблице 13. Результаты исследований представлены на рисунке 35.

Таблица 13 – Управляющие факторы при проведении эксперимента

№п/п	Наименование фактор	Значение
1.	Образец испытываемого материала толщиной, мм: - свинец - свинец - просвинцованная резина - «Плитотрен» с содержанием наполнителя 20, 30 и 40% - «DS-1» содержанием наполнителя 20, 30 и 40%	1,05 0,75 5 13±0,1 16±0,1
2.	Напряжение на трубке, кэВ	40 60 75

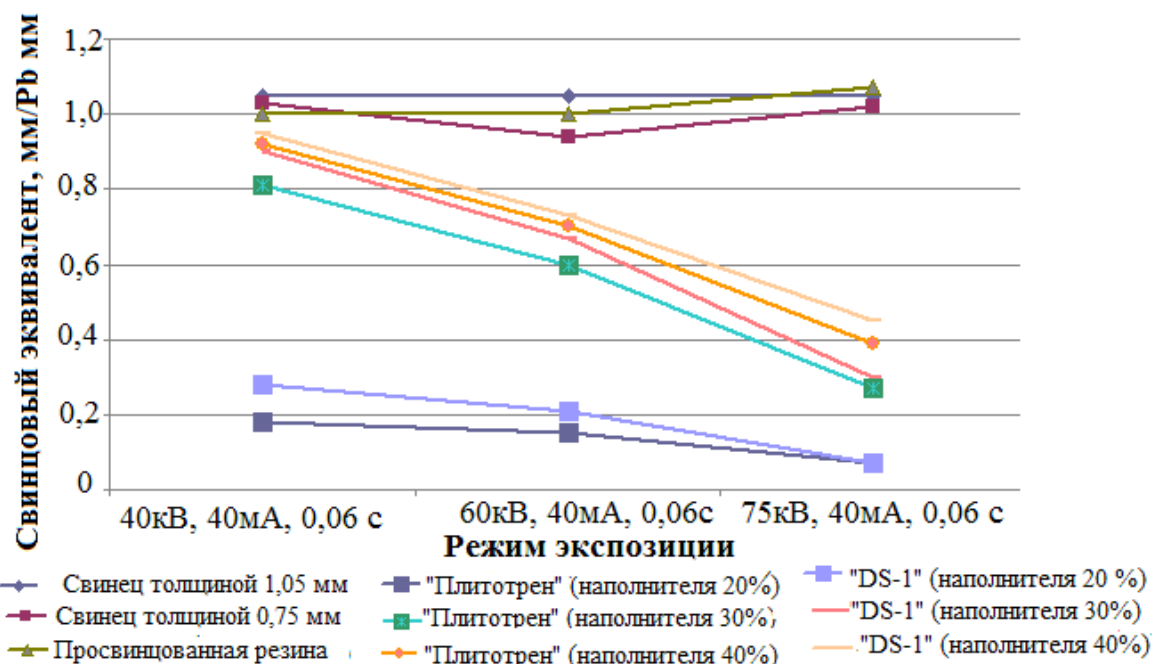
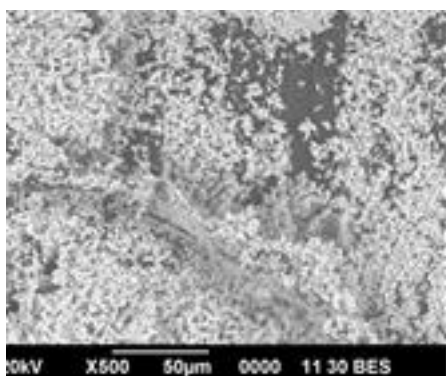


Рисунок 35 – Рентгенозащитные свойства материалов в зависимости от режима экспозиции

Для исследования равномерности распределения наполнителя (сульфата бария) в древесно-клеевой композиции композиционных материалов «Плитотрен» и «DS-1» проводились микросъемка образцов на электронном микроскопе JSM-6390. Полученные микроснимки представлены на рисунках 36 и 37.

а)



б)

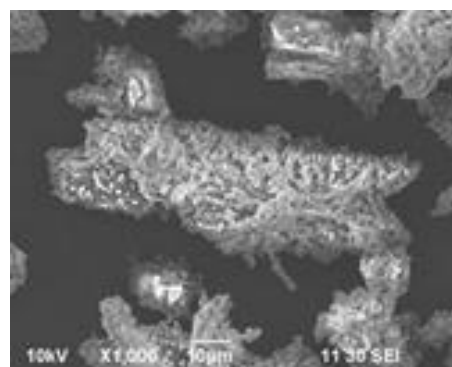


Рисунок 36 – Микросъемка древесно-клеевой композиции материала:
а) «Плитотрен» (увеличение ×500); б) «DS-1» (увеличение ×1000)

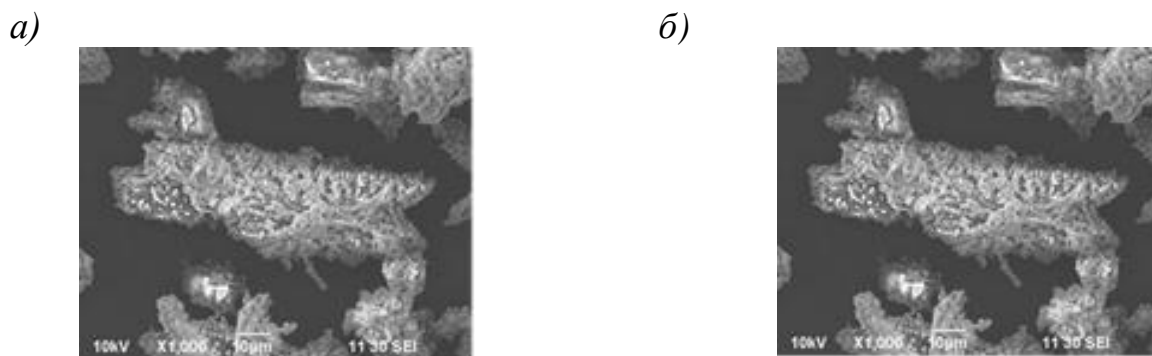


Рисунок 37 – Структура материала:

а) «Плитотрен» (увеличение $\times 500$); б) «DS-1» (увеличение $\times 500$)

В шестой главе подобрано технологическое оборудование для производства предлагаемых древесных композиционных материалов, обладающих рентгенозащитными свойствами, разработаны схемы технологического процесса производства этих материалов для условий промышленного производства.

Расчет экономических показателей показал, что организация производства по выпуску древесных материалов, обладающих рентгенозащитными свойствами экономически целесообразна. Стоимость 1 м² материалов «Фанотрен А» и «Фанотрен Б» соответственно составляет 18800 руб. и 1600 руб., материалов «Плитотрен» и «DS-1» соответственно - 580 руб. и 2600 руб., рентабельность производства колеблется от 12 до 17 % при этом срок окупаемости производства в пределах одного года.

Вопрос выбора наилучшего из четырех предложенных древесных композиционных материалов по комплексу свойств решен с использованием метода расстановки приоритетов. Проведенный сравнительный анализ предложенных материалов показал, что по своим рентгенозащитным свойствам, а также стоимости они способны конкурировать с материалами, широко применяемым для этих целей в настоящее время.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Древесные слоистые и плитные материалы являются эффективной заменой, как цельной древесины, так и других конструкционных, декоративных и материалов, обладающих особыми свойствами.

2. В настоящее время на отечественном рынке представлена широкая гамма разнообразных материалов, способных выполнить защиту от рентгеновского излучения, однако их отличают либо низкие конструкционные и эксплуатационные свойства, либо высокая стоимость. Древесные композиционные материалы, в этом отношении, позволяют решить данный компромисс.

3. Теоретически доказано, и экспериментально подтверждено, что поверхность лущеного шпона представляет собой реализацию нормального стационарного случайного процесса. Распределение неровностей на поверхности лущеного шпона подчиняется математическому описанию корреляционными и аппроксимирующими функциями второго типа.

4. Кривая опорной поверхности с высокой достоверностью отражает процесс контакта листов лущеного шпона в процессе их склеивания, в том числе и при использовании в качестве адгезива легкоплавких металлов (например, сплава Вуда). При этом толщина армирующего слоя, исходя из требуемой величины рентгенозащитных свойств, должна составлять не менее $0,3 \pm 0,05$ мм.

5. Процесс прессования древесных композиционных материалов на основе порошкового связующего может быть описан системой ДУЧП при контактном нагреве влажного пористого тела с введением внутренних коэффициентов тепло- и массообмена, которая включает уравнения: фильтрации; переноса паровоздушной смеси; уравнение влагосодержания; теплопроводности в скелете пористого тела; переноса энергии паровоздушной смесью.

На основании решения данной системы можно заключить:

- относительно малые относительно малые величины давления парогазовой смеси и его градиента обуславливают незначительный перенос тепла в плоскости плиты за счёт конденсации и конвекции, что уменьшает скорость прогрева прессуемого пакета;

- возможно некоторое изменение продолжительности цикла прессования как в большую (продолжительность выдержки пакета под давлением), так и в меньшую (продолжительность снижения давления) сторону.

6. Для описания поведения древесных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами в момент нахождения их под нагрузкой использовано уравнение Софии – Жермен.

7. Контактная поверхность древесного шпона является гидрофобной по отношению к металлической фольге, поэтому контактное взаимодействие между этими материалами достигается лишь механическим внедрением адгезива, находящегося в расплавленном состоянии вглубь пористой структуру древесины лиственных пород. Адгезионная прочность – это результат действия сил механической адгезии, которая в данном случае характеризуется количеством «якорных зацеплений», степенью разветвленности этих зацеплений и глубиной проникновения расплавленного сплава в граничные слои древесного субстрата;

8. Для конструкции древесного композита «Фанотрен А» характерно проникновение в поры древесного шпона лиственных пород жидкого сплава, выступающего в роли адгезива в конструкции материала, в период предшествующий его затвердеванию. Проникающий в поры древесины сплав распределяется по внутренним полостям, образуя своеобразную пространственную систему с различными ответвлениями, разных размеров, и образует при затвердевании прочный клеевой шов. Слой фольги толщиной 0,3 мм в конструкции материала распределяется следующим образом: толщина сплошно армирующего слоя составляет $0,175 \div 0,181$ мм; глубина проникновения адгезива в толщину шпона – $0,29 \div 0,33$ мм.

9. Рациональные режимы создания конструкции древесного композиционного материала «Фанотрен А» - шероховатость поверхности шпона – 60 мкм, толщина прессуемого материала – 3,6 мм, продолжительность прессования – 6 мин. При этом ожидаемые физико-механические свойства – предел проч-

ности: при скалывании по клеевому слою 0,47 МПа, при статическом изгибе вдоль наружных слоев – 80 МПа, при растяжении вдоль волокон – 62 МПа.

10. Для создания РЗС, используемых в качестве армирующих элементов в конструкции материала «Фанотрен Б» используется пропитывающая композиция, на основе минерального наполнителя (сульфата бария). Его содержание не должно превышать 60 %, т.к. его дальнейшее увеличение приведет к получению высоковязкой смеси, не способной пропитать матрицу.

11. Увеличение температуры сушки РЗС до $100 \pm 5^\circ\text{C}$ позволит сократить ее продолжительность до 3,5 - 4 ч.

12. Рациональные режимы создания древесного композиционного материала «Фанотрен Б» – расход связующего – 175 г/м^2 ; температура плит пресса – 65°C , продолжительность прессования – 6,2 мин. При этом ожидаемые физико-механические свойства – предел прочности: при скалывании по клеевому слою 1,43 МПа, при статическом изгибе вдоль наружных слоев – 17,5 МПа, при растяжении вдоль волокон – 32 МПа.

13. Степень водопоглощения материала «Фанотрен Б» – 63,5%, разбухание по толщине – 17 %; у «Фанотрен А» - эти показатели не нормируются;

14. Свинцовый эквивалент (режим экспонирования: напряжение 60 кэВ, сила тока 40 мА, время 0,06 с) для материала «Фанотрен А» составляет 0,78 мм/Pb мм, для материала «Фанотрен Б» - 0,56 мм/Pb мм.

15. Увеличение содержания минерального наполнителя (сульфата бария) в древесно-клеевой композиции повышает водостойкость древесных композиционных материалов «Плитотрен» и «DS-1». Так повышение содержания наполнителя до 40 % снижает разбухание по толщине по сравнению с его нулевым содержанием в 1,8 раза для материала «Плитотрен» и в 2,4 раза для материала «DS-1».

16. Прочностные характеристики материалов «Плитотрен» и «DS-1» при увеличении содержания минерального наполнителя падают. Так, предел прочности при статическом изгибе существенно уменьшается (более чем в 2 раза), что можно объяснить ухудшением адгезии между расплавленным адгезивом и субстратом за счет присутствия микрочастиц наполнителя.

17. Зависимости ударной вязкости и твердости по Бринеллю от количества минерального наполнителя в древесно-клеевой композиции материалов «Плитотрен» и «DS-1» установить не удалось, т.к. большой разброс полученных результатов, как по опытам, так и по повторениям одного опыта не позволяет дать однозначного заключения.

18. Древесно-клеевая композиция материала «Плитотрен» должна содержать 27,2% связующего, 30% - наполнителя (сульфата бария), при этом ожидаемая плотность плиты будет составлять 850 кг/м^3 ; для материала «DS-1» - содержание связующего – 22,4%, наполнителя 27,6%, а плотность плиты – 1000 кг/м^3 .

19. Ожидаемые физико-механические свойства материала «Плитотрен»: разбухание по толщине – 9,5 %, предел прочности при статическом изгибе – 15,2 МПа; соответственно для материала «DS-1» - 8,7 % и 13,5 МПа.

20. Увеличение количества минерального наполнителя в древесно-клеевой композиции материалов «Плитотрен» и «DS-1» повышает рентгенозащитные свойства предлагаемых материалов.

21. При содержании минерального наполнителя в древесно-клеевой композиции в пределах от 20 до 30 % наблюдается интенсивное ослабление рентгеновского излучения материалами «Плитотрен» и «DS-1». Дальнейшее увеличение содержания наполнителя в композиции не приводит к существенному увеличению их рентгенозащитных свойств. Поэтому учитывая влияние наполнителя на физико-механические свойства материалов рекомендуется его вводить в древесно-клеевую композицию в пределах от 28 до 30 %.

22. Равномерность распределения наполнителя (сульфата бария) зависит от его количества в древесно-клеевой композиции и от размера древесных частиц. Более мелкие древесные частицы, используемые для изготовления материалов «Плитотрен» и «DS-1» позволяют равномернее распределиться частицам наполнителя по материалам. Это, в свою очередь, повышает их рентгенозащитные свойства.

23. Свинцовый эквивалент при содержании наполнителя в количестве 30% (режим экспонирования: напряжение 60 кэВ, сила тока 40 мА, время 0,06 с) для материала «Плитотрен» составляет 0,39 мм/Pb мм, для материала «DS-1» - 0,47 мм/Pb мм.

24. По содержанию свободного формальдегида материал «Плитотрен» имеет класс эмиссии Е 1, а материал «DS-1» – Е 0,5.

25. Организация производства по выпуску древесных композиционных материалов, обладающих рентгенозащитными свойствами экономически целесообразна. Рентабельность составляет от 12 до 17 %, срок окупаемости производства в пределах одного года.

26. По комплексу свойств наилучшим материалом является «DS-1». Остальные материалы имеют несколько меньшую по комплексу свойств суммарную оценку, которая лишь незначительно отличается от «DS-1». Это свидетельствует о высоком качестве разработанных композиционных материалов с рентгенозащитными свойствами.

27. Разработанные древесные композиционные материалы по своим рентгенозащитным свойствам и стоимости способны конкурировать с материалами, широко применяемым для этих целей в настоящее время.

28. По результатам исследований изготовлена опытно-промышленная партия разработанных древесных композиционных материалов в условиях ОАО «Этюд-Урал» г. Екатеринбург и ООО «БиКдрев» г. Екатеринбург, что подтверждает возможность их изготовления в условиях промышленного производства.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В изданиях, индексируемых в Web of Science:

1. **Яцун И.В.** Исследование физико-механических и рентгенозащитных свойств деревокомпозиционного слоистого материала «Фанотрен Б» / И.В. Яцун, А.Г. Гороховский, С.А. Одинцева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2019. №3 (19). – С.110-120. doi:10.17238/issn0536-1036.2019.3.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

2. **Яцун И.В.** Расчет минимальной толщины защитно-клеевой прослойки в слоистом материале на основе древесины / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2005. №3. – С. 97-102.

3. Ветошкин Ю.И. Общий подход к расчету напряженно-деформированного состояния композиционного слоистого материала «Фанотрен Б» с защитными свойствами от рентгеновского излучения / Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, **И.В. Яцун**, С.А. Одинцева // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2007. №8. – С. 149-151.

4. Ветошкин Ю.И. Совершенствование технологии создания рентгенозащитных лакокрасочных покрытий / Ю.И. Ветошкин, С.Б. Шишкина, **И.В. Яцун** // Деревообрабатывающая промышленность, 2007. №5. – С. 23-25.

5. Ветошкин Ю.И. О возможности применения композиционных материалов «Фанотрен» и «Плитотрен» на основе древесины в качестве защитных для медицинских рентгенкабинетов / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, А.В. Мялицин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник, 2008. №3. – С. 145-147.

6. Карев Б.Н. Теоретическое определение толщины рентгенозащитного композиционного материала / Б.Н. Карев, **И.В. Яцун**, Ю.И. Ветошкин, А.В. Мялицин // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т.16. №1. – С. 44-47.

7. **Яцун И.В.** Применение отходов деревоперерабатывающих производств в изготовлении конструкционных материалов со специфическими свойствами / И.В. Яцун, С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин // Лесотехнический журнал, 2014. Т.4 №3(15). – С. 220-229.

8. Ветошкин Ю.И. Композиционный материал марки «Плитотрен» / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, Ю.И. Цой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2014. №209. – С. 212-220.

9. Ветошкин Ю.И. Композиционный слоистый материал «Фанотрен» / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, Ю.И. Цой // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2015. №210. – С. 149-156.

10. Одинцева С.А. Анализ напряженно-деформированного состояния слоистого материала специального назначения на основе древесины / С.А. Одинцева, С.Н. Исаков, **И.В. Яцун** // Деревообрабатывающая промышленность, 2017. №4. – С. 34-40.

11. **Яцун И.В.** Декоративные рентгенозащитные стеновые панели / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин, А.Г. Гороховский // Хвойные бореальной зоны, 2018. XXXVI. №5. – С. 466-470.

12. Гороховский А.Г. Анализ процесса формирования древесного композиционного материала на основе порошкового связующего / А.Г. Гороховский, **И.В. Яцун**, Е.Е. Шишкина // Деревообрабатывающая промышленность, 2019. №3. – С. 41-47.

Монографии:

13. Ветошкин Ю.И. Конструкции и эксплуатационно-технологические особенности композиционных рентгенозащитных материалов на основе древесины: монография / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, О.Н. Чернышев. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. – 148 с.

14. Ветошкин Ю.И. Композиционные материалы на основе древесины и их эксплуатационные свойства / Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, **И.В. Яцун**. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 119 с.

15. Ветошкин Ю.И. Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун** И.В. Коцюба, - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2018. – 100 с.

Патенты:

16. Патент 10638 Российская Федерация, МПК В32В21/04. Слоистый материал / Ветошкин Ю.И.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический ун-т»; Ю.И. Ветошкин, В.А. Ягуткин, **И.В. Яцун**. - №99104962/20.

17. Патент 125518 Российская Федерация, МПК G21F1/12. Композиционный слоистый материал / Ветошкин Ю.И.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический ун-т»; Ю.И. Ветошкин, С.А. Одинцева, **И.В. Яцун**, И.В. Коцюба. - №2011115495/05.

В статьях, материалах и тезисах конференций:

18. Ветошкин Ю.И. Слоистый материал с защитными свойствами / Ю.И. Ветошкин, А.В. Дружинин, **И.В. Яцун** // Вклад ученых и специалистов в развитие химико-лесного комплекса. – Екатеринбург: УГЛТА, 1997. – С. 55-56.

19. **Яцун И.В.** Конструкционный материал с защитными свойствами / И.В. Яцун, Н.В. Кудряшова, Н.Д. Горшунова // Материалы научно-технич. конф. студентов и аспирантов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2001. – С. 47-50.

20. Ветошкин Ю.И. Декоративный защитный материал для рентгенкабинетов / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, С.В. Соболева // Домострой. - Екатеринбург: ООО «Диалог-дизайн», 2001. №12. – С. 16-20.

21. Ветошкин Ю.И. Прогрессивный облицовочно-конструкционный материал для рентгеновских кабинетов / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, С.В. Соболева // Электрон. журн. «Технология качества жизни». - Екатеринбург: УГЛТУ, 2001. Т.1. №2. – С. 49-51.

22. Ветошкин Ю.И. Технологические основы получения защитного материала / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, В.А. Ягуткин, Ю.И. Цой // Межвуз. сб.

Технология древесных плит и пластиков. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. – С. 232-235.

23. Ветошкин Ю.И. Ослабление рентгеновских лучей конструкционно-слоистым материалом / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, С.В. Соболева // Научные труды. Вып.2. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. – С. 30-34.

24. Ветошкин Ю.И. Декоративный облицовочно-конструкционный материал для рентгенкабинетов / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, Ю.И. Цой // дизайн и производство мебели, 2003. №4. – С. 18-21.

25 **Яцун И.В.** Слоистый материал специального назначения на основе древесины: диссертация на соис. ученой степени кандидата технических наук / И.В. Яцун – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2003. – 237 с.

26. Ветошкин Ю.И. Метод исследования структуры клеевого слоя и распределения в нем связующего при формировании клеевого соединения на основе древесины / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун** // Межвуз. сб. Технология древесных плит и пластиков. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2004. – С. 50-53.

27. Крюк В.И. Композиционные рентгенозащитные материалы на основе древесины и древесных отходов / В.И. Крюк, Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, Ан.В. Мялицин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды II Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. – С. 90-94.

28. Ветошкин Ю.И. Некоторые сведения о слоистых композитах, оценка защитных свойств слоистого материала Фанотрен В / Ю.И. Ветошкин, С.А. Одинцева, **И.В. Яцун** // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Матер.VII Всероссийской науч. – технич. конф. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. – С. 232-235.

29. **Яцун И.В.** Исследование рентгенозащитных свойств армирующего слоя композиционного материала на основе древесины / И.В. Яцун, А.А. Каменщикова, С.А. Одинцева, А.М. Яцун // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2012. – С. 194-196.

30. **Яцун И.В.** Способ облагораживания поверхности композиционных плитных материалов для придания им рентгенозащитных свойств / И.В. Яцун, С.Б. Шишкина, Ю.И. Ветошкин, Ю.С. Грачева // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2012. – С. 185-187.

31. **Яцун И.В.** Определение рецептуры рентгенозащитного пропитывающего состава для материала на основе древесины / И.В. Яцун, А.А. Каменщикова // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы IX Всероссийской научно-технич. конф., Ч.1, Екатеринбург, 2013. – С. 182-184.

32. **Яцун И.В.** Интенсификация процесса сушки армирующего рентгенозащитного композиционного материала на основе древесины / И.В. Яцун, С.А. Одинцева // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы IX Всероссийской научно-технич. конф., Ч.1, Екатеринбург, 2013. – С. 216-218.

33. **Яцун И.В.** Получение листового проката из легкоплавкого сплава Вуда для армирования рентгенозащитного материала на основе древесины / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин // Леса России и хозяйство в них, 2013. №4-47. – С.94-95.
34. **Яцун И.В.** Исследование адгезионных параметров композиционных материалов / И.В. Яцун, С.Б. Шишкина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т.2. №1(6). – С. 55-63.
35. **Яцун И.В.** Исследование процесса сушки армирующего рентгенозащитного композиционного материала на основе древесины / И.В. Яцун, С.Б. Шишкина, С.В. Совина // Леса России и хозяйство в них, 2014. №1. – С.64-67.
36. **Яцун И.В.** Исследование процесса сушки армирующего рентгенозащитного композиционного материала на основе древесины / И.В. Яцун, С.Б. Шишкина, С.В. Совина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды IX Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – С. 111-115.
37. Шишкина С.Б. Определение условного коэффициента защиты лакокрасочной композиции со специфическими свойствами методом оценки результатов цифровой рентгенографии / С.Б. Шишкина, **И.В. Яцун**, Ю.И. Ветошкин, С.В. Совина // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2015. №2(175). –С. 174-179.
38. Чернышев О.Н. Композиционный декоративный материал «Фанотрен А» / О.Н. Чернышев, Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун** // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XII Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – С. 84-86.
39. Чернышев О.Н. Рентгенозащитный материал на основе отходов древесины / О.Н. Чернышев, Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, Д.О. Чернышев // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XII Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – С. 87-90.
40. Сергиенко А.В. Необходимость рационального использования отходов деревообработки / А.В. Сергиенко, **И.В. Яцун** // Наука и образование сегодня, 2017. №1(12) – С.12-13.
41. Сергиенко А.В. Обзор способов использования отходов деревообработки в России / А.В. Сергиенко, **И.В. Яцун** // Наука и образование сегодня, 2017. №1(12) – С. 16-17.
42. Сергиенко А.В. Экологическая опасность основных связующих для производства древесных плит / А.В. Сергиенко, **И.В. Яцун** // Научные исследования, 2017. Т.2. №6(17) – С. 5-6.
43. Сергиенко А.В. Нормирование и контроль эмиссии формальдегида из древесных материалов / А.В. Сергиенко, **И.В. Яцун** // Проблемы науки, 2018. №1(25) – С. 9-10.
44. **Яцун И.В.** Адгезия жидкостей в древесине / И.В. Яцун, А.С. Чатинян // Проблемы науки, 2018. №4(28) – С. 41-43.

45. Ветошкин Ю.И. Плитные слоистые материалы из шпона специального назначения / Ю.И. Ветошкин, **И.В. Яцун**, М.В. Газеев, О.Н. Чернышев // Лес-проминформ, 2019. №1 (139). – С. 110-111.

46. **Яцун И.В.** Влияние количества минерального наполнителя на физико-механические свойства древесных плит «Плитотрен» и «DS-1» / И.В. Яцун, А.Г. Гороховский, Ю.И. Ветошкин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIV Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. – С.100-106.

47. **Яцун И.В.** Инновационный композиционный материал из древесного шпона «Фанотрен А» / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIV Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. – С. 91-95.

48. **Яцун И.В.** Исследование макроструктуры композиционных рентгено-защитных древесных плит «Плитотрен» и «DS-1» / И.В. Яцун, Ю.И. Ветошкин, А.Г. Гороховский // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды XIV Международного Евразийского симпозиума. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2019. – С. 95-100.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать

Объем 2,38 авт.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №

Уральский государственный лесотехнический университет
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Отдел оперативной полиграфии